



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y  
AUTOMÁTICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ESTUDIO Y DISEÑO DE UN CONTROLADOR  
LQG EN MATLAB PARA LA SUSPENSIÓN  
SEMI-ACTIVA DE UN VEHÍCULO  
FERROVIARIO**

Integrante: D. Juan Bautista de la Peña Abad

Tutor: D. Francisco José Rodríguez Urbano

LEGANÉS - 2017



Título: Estudio y diseño de un controlador LQG en MATLAB para la suspensión semi-activa de un vehículo ferroviario.

Autor: Juan Bautista de la Peña

Director:

## EL TRIBUNAL

Presidente: \_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Secretario: \_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día \_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



# RESUMEN

Este proyecto abarca el diseño de un controlador óptimo LQG mediante el programa matemático MATLAB, para su uso en la suspensión de un vehículo ferroviario.

En primer lugar se desarrolla un estudio del estado del arte tanto de la suspensión en vehículos ferroviarios como de los sistemas de control.

En segundo lugar se desarrollan las ecuaciones que gobiernan el diagrama de estados de un controlador óptimo LQG y el modelo analítico de un sistema de suspensión semi-activo.

Una vez obtenido las ecuaciones del modelo analítico, se diseña el controlador LQG en el sistema de MATLAB, adecuándolo a su lenguaje de programación.

Por último se modela un vehículo ferroviario en SIMPACK para posibles trabajos futuros sobre este campo.

**Palabras clave:** suspensión, vehículo ferroviario, semi-activa, controlador, LQG, MATLAB



# ABSTRACT

This project covers the design of an optimal LQG controller using the mathematical program MATLAB, for the suspension of a railway vehicle.

First, a study of the state of both suspension in rail vehicles and control systems is developed.

Second, the equations that govern the state diagram of an LQG optimal controller and the analytical model of a semi-active suspension system are developed.

Once the equations of the analytical model are obtained, the LQG controller is designed in the MATLAB system, adapting it to its programming language.

Finally, a railway vehicle is modeled in SIMPACK for possible future works on this field.

**Keywords:** suspension, rail vehicle, semi-active, controller, LQG, MATLAB





# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	2
1.2. OBJETIVO.....	4
1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA .....	5
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DE LA SUSPENSIÓN EN VEHÍCULOS FERROVIARIOS .....</b>	<b>7</b>
2.1. SUSPENSIÓN SEGÚN POSICIÓN .....	8
2.1.1. <i>Suspensión Primaria</i> .....	11
2.1.2. <i>Suspensión secundaria</i> .....	12
2.2. ELEMENTOS QUE AFECTAN A LA SUSPENSIÓN .....	13
2.2.1. <i>Elementos elásticos</i> .....	13
2.2.1.1. Ballestas .....	14
2.2.1.2. Muelles helicoidales .....	15
2.2.1.3. Barras de torsión .....	17
2.2.1.4. Muelles elastómeros .....	18
2.2.1.5. Suspensión Neumática .....	19
2.2.2. <i>Elementos amortiguadores</i> .....	20
2.2.2.1. Amortiguadores de fricción.....	21
2.2.2.4. Amortiguadores hidráulicos .....	22
2.3. SUSPENSIÓN SEGÚN CONFIGURACIÓN .....	24
2.3.1. <i>Suspensión pasiva</i> .....	25
2.3.2. <i>Suspensión activa</i> .....	25
2.3.3. <i>Suspensión semi-activa</i> .....	27
<b>CAPÍTULO 3. CONTROL DE LOS SISTEMAS DE SUSPENSIÓN EN VEHÍCULOS FERROVIARIOS.....</b>	<b>29</b>
3.1. ESTADO DEL ARTE DE LOS CONTROLADORES CONVENCIONALES .....	31
3.1.1. <i>Controlador óptimo (LQR y LQG)</i> .....	31
3.1.1.1. Estimador de Kalman .....	32
3.1.2. <i>Controlador proporcional, integral y derivativo (PID)</i> .....	33
3.1.3. <i>Controlador por modos deslizantes</i> .....	34
3.1.4. <i>Controlador adaptativo</i> .....	34
3.1.5. <i>Controlador skyhook y groundhook</i> .....	35
3.1.6. <i>Controlador robusto</i> .....	35
3.2. ESTADO DEL ARTE DE LOS CONTROLADORES DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL .....	36
3.2.1. <i>Controlador por redes neuronales</i> .....	36
3.2.2. <i>Controlador de lógica borrosa</i> .....	36

3.2.3. Controlador basado en algoritmos evolutivos y bioinspirados .....	37
<b>CAPÍTULO 4. CONFIGURACIÓN DE UN CONTROLADOR LQG.....</b>	<b>39</b>
4.1. DISEÑO DE UN CONTROLADOR LQG .....	40
4.2. MODELADO DE UN CONTROLADOR LQG.....	42
4.2.1. Modelo analítico de un sistema de suspensión activa .....	42
4.2.2. Modelo analítico de un sistema de suspensión semi-activa .....	44
<b>CAPÍTULO 5. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
5.1. SOFTWARE UTILIZADO (MATLAB) .....	52
5.2. DISEÑO DE UN CONTROLADOR LQG EN MATLAB.....	53
5.3. RESULTADOS.....	67
<b>CAPÍTULO 6. MODELADO DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO PARA FUTUROS TRABAJOS.....</b>	<b>73</b>
6.1. SOFTWARE UTILIZADO (SIMPACT) .....	74
6.1.1. Preprocesador .....	76
6.1.2. Postprocesador .....	77
6.1.3. Solucionador .....	78
6.1.4. Wizard.....	79
6.2. MODELADO DEL TREN.....	80
6.2.1. Pasos previos.....	80
6.2.2. Modelado de las ruedas-eje.....	81
6.2.2.1. Creación del modelo ruedas-eje.....	81
6.2.2.2. Definición del estado inicial de equilibrio .....	82
6.2.3. Modelado del bogie .....	82
6.2.4. Modelado del cabezal fijo .....	83
6.2.5. Modelado de la suspensión.....	84
6.2.5.1. Suspensión primaria .....	84
6.2.5.2. Suspensión secundaria .....	85
6.2.6. Modelado del vagón .....	86
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>87</b>
7.1. CONCLUSIONES.....	88
7.2. TRABAJOS FUTUROS.....	88
<b>PRESUPUESTO .....</b>	<b>91</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS .....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO A. NOMENCLATURA DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN SEMI-ACTIVA .....</b>	<b>97</b>
<b>ANEXO B. ECUACIONES DE LAS FUERZAS QUE ACTÚAN EN UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN SEMI-ACTIVA .....</b>	<b>101</b>

<b>ANEXO C. ELEMENTOS SIMPACK.....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO D. PASOS TÉCNICOS PARA LA CREACIÓN DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO EN SIMPACK .....</b>	<b>109</b>
D.1. CREACIÓN DE LA SUBESTRUCTURA “JUEGO DE RUEDAS” .....	110
D.2. CREACIÓN DE LA SUBESTRUCTURA “BOGIE” .....	111
<i>D.2.1. Creación del “frame” del bogie.....</i>	<i>111</i>
<i>D.2.2. Creación del cabezal fijo .....</i>	<i>119</i>
<i>D.2.3. Creación de la suspensión primaria .....</i>	<i>122</i>
<i>D.2.4. Creación de la suspensión secundaria .....</i>	<i>126</i>
D.3. CREACIÓN DEL VEHÍCULO FERROVIARIO .....	130



# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. BOGIE .....	9
FIGURA 2.2. <i>BOGIE</i> ENTRE COCHES DE RENFE .....	9
FIGURA 2.3. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN <i>BOGIE</i> .....	10
FIGURA 2.4. ESQUEMA DE LA SUSPENSIÓN SEGÚN LA POSICIÓN .....	11
FIGURA 2.5. GUIADO DE LAS RUEDAS POR PARTE DE LA SUSPENSIÓN PRIMARIA .....	12
FIGURA 2.6. SUSPENSIÓN SECUNDARIA VERTICAL (1) Y LATERAL (2) .....	13
FIGURA 2.7. ELEMENTOS DE UNA BALLESTA.....	14
FIGURA 2.8. BALLESTA EN UN TREN DE MERCANCÍAS. ....	15
FIGURA 2.9. POSICIONES DE UN MUELLE HELICOIDAL DEBIDO A LA CARGA QUE SOPORTA. ....	16
FIGURA 2.10. MUELLES HELICOIDALES CONCÉNTRICOS. ....	16
FIGURA 2.11. CURVA DE COMPRESIÓN (FLEXIBILIDAD FRENTE A DIÁMETRO) DE UN MUELLE NORMAL Y OTRO PROGRESIVO. ....	17
FIGURA 2.12. TIPOS DE MONTAJE DE LAS BARRAS DE TORSIÓN .....	17
FIGURA 2.13. MUELLES ELASTÓMEROS EN UNA CAJA DE GRASA.....	18
FIGURA 2.14. SUSPENSIÓN NEUMÁTICA EN UN BOGIE .....	20
FIGURA 2.15. AMORTIGUADOR DE FRICCIÓN. ....	21
FIGURA 2.16. AMORTIGUADOR HIDRÁULICO DE DOBLE TUBO. ....	23
FIGURA 2.17. AMORTIGUADOR HIDRÁULICO MONOTUBO. ....	23
FIGURA 2.18. ESQUEMA DE SUSPENSIÓN PASIVA .....	25
FIGURA 2.19. ESQUEMA DE SUSPENSIÓN ACTIVA .....	26
FIGURA 2.20. ESQUEMA DE SUSPENSIÓN SEMI-ACTIVA .....	27
FIGURA 2.21. COMPORTAMIENTO DE LAS MOLÉCULAS DENTRO DE UN AMORTIGUADOR .....	28
FIGURA 3.1. DIAGRAMA DE LA DESCRIPCIÓN DEL FILTRO DE KALMAN.....	33
FIGURA 3.2. CONTROLADOR PID EN LAZO CERRADO.....	34
FIGURA 4.1. DIAGRAMA DE UN CONTROLADOR LQG .....	40
FIGURA 4.2. MODELO DE UN CUARTO DE VEHÍCULO .....	43

FIGURA 4.3. VISTAS DESDE ABAJO Y LATERAL DE UN MODELO DE VEHÍCULO FERROVIARIO DE 9 GRADOS DE LIBERTAD.....	45
FIGURA 4.4. VISTA FRONTAL DE UN MODELO DE VEHÍCULO FERROVIARIO DE 9 GRADOS DE LIBERTAD.....	46
FIGURA 4.5. ESQUEMA DE CONTROL PARA UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN SEMI-ACTIVO .....	47
FIGURA 6.1. PANTALLA DEL PREPROCESADOR.....	77
FIGURA 6.2. POSTPROCESADOR DE SIMPACK .....	78
FIGURA 6.3. OPCIONES DE ANÁLISIS QUE OFRECE EL SOLUCIONADOR DE SIMPACK .....	79
FIGURA 6.4. EJEMPLO DE CONFIGURACIÓN DE UN MODELO DE COCHE MEDIANTE EL MÓDULO WIZARD .....	79
FIGURA 6.5. PASOS PREVIOS. CREACIÓN DE CARPETAS.....	80
FIGURA 6.6. MODELADO DE UN EJE .....	81
FIGURA 6.7. MODELADO DEL CONJUNTO RUEDAS-EJE.....	82
FIGURA 6.8. SUBESTRUCTURAS DE DOS CONJUNTOS RUEDAS-EJE .....	83
FIGURA 6.9. MODELADO DEL BOGIE .....	83
FIGURA 6.10. MODELADO DEL BOGIE CON CABEZAL FIJO .....	84
FIGURA 6.11. MODELADO DE LA SUSPENSIÓN PRIMARIA .....	85
FIGURA 6.12. MODELADO DE LA SUSPENSIÓN SECUNDARIA .....	86
FIGURA 6.13. MODELADO DEL VEHÍCULO FERROVIARIO.....	86
FIGURA D.1. CREACIÓN DE MARCADORES EN LA SUBESTRUCTURA “JUEGO DE RUEDAS” WS .....	111
FIGURA D.2. SELECCIÓN DE LAS RUTAS DE BÚSQUEDA .....	112
FIGURA D.3. BOTÓN “CREATESUBESTRUCTURE” .....	112
FIGURA D.4. CREAR SUBESTRUCTURA “\$S_WSR” .....	113
FIGURA D.5. CAMBIO DEL VALOR DE LA POSICIÓN LONGITUDINAL EN EL JUEGO DE RUEDAS WSR.....	113
FIGURA D.6. MODELO DE DOS JUEGOS DE RUEDAS .....	114
FIGURA D.7. PROPIEDADES DEL ELEMENTO “BODY” BOGIE .....	114
FIGURA D.8. PROPIEDADES DE LA PRIMITIVA “\$P_BOGIE_FRAME” DEL ELEMENTO CUERPO “BOGIE” ..	115
FIGURA D.9. PROPIEDADES DE LA PRIMITIVA “\$P_BOGIE_FRAME_CUBO” DEL ELEMENTO CUERPO “BOGIE” .....	116
FIGURA D.10. PROPIEDADES DEL ELEMENTO “JOINT” DEL CUERPO “BOGIE” .....	117
FIGURA D.11. MODELO DE BOGIE I .....	117

FIGURA D.12. MARCADORES DEL ELEMENTO CUERPO “BOGIE” .....	119
FIGURA D.13. SISTEMAS DE COORDENADAS DE LOS MARCADORES CREADOS EN EL ELEMENTO CUERPO “BOGIE” .....	119
FIGURA D.14. PROPIEDADES DEL ELEMENTO “BODY” DUMMY.....	120
FIGURA D.15. PROPIEDADES DE LA PRIMITIVA “\$P_DUMMY” DEL ELEMENTO CUERPO “DUMMY” .....	121
FIGURA D.16. PROPIEDADES DEL ELEMENTO “JOINT” DEL CUERPO “DUMMY” .....	121
FIGURA D.17. PROPIEDADES DEL ELEMENTO FUERZA “\$F_PRIMSPRING_FR” .....	123
FIGURA D.18. PROPIEDADES DEL ELEMENTO FUERZA “\$F_PRIMDAMP_FR” .....	124
FIGURA D.19. PROPIEDADES DEL ELEMENTO “INPUT FUNCTION” “\$I_PRIMDAMPER” .....	125
FIGURA D.20. ELEMENTOS FUERZA CORRESPONDIENTES A LA SUSPENSIÓN PRIMARIA .....	125
FIGURA D.21. PROPIEDADES DEL ELEMENTO FUERZA “\$F_SECR” .....	126
FIGURA D.22. PROPIEDADES DEL ELEMENTO FUERZA “\$F_SECDAMPVERT” .....	127
FIGURA D.23. PROPIEDADES DEL ELEMENTO “INPUT FUNCTION” “\$I_DAMPERVERT” .....	127
FIGURA D.24. ELEMENTOS FUERZA CORRESPONDIENTES A LA SUSPENSIÓN SECUNDARIA VERTICAL ...	128
FIGURA D.25. PROPIEDADES DEL ELEMENTO FUERZA “\$F_SECDAMPRLAT” .....	129
FIGURA D.26. PROPIEDADES DEL ELEMENTO FUERZA “\$F_SECROLLBAR” .....	129
FIGURA D.27. PROPIEDADES DEL ELEMENTO FUERZA “\$F_BUMPSTOP”9.....	130
FIGURA D.28. IMPORTAR LOS DOS BOGIES.....	131
FIGURA D.29. CAMBIO DE LA POSICIÓN LONGITUDINAL EN LOS <i>BOGIES</i> Y JUEGOS DE RUEDAS .....	132
FIGURA D.30. CAMBIO DE LA POSICIÓN LONGITUDINAL EN LOS <i>BOGIES</i> Y JUEGOS DE RUEDAS .....	132
FIGURA D.31. PROPIEDADES DEL ELEMENTO “WAGON” .....	133
FIGURA D.32. PROPIEDADES DE LA PRIMITIVA “\$P_WAGON” DEL ELEMENTO CUERPO “WAGON”. PARÁMETROS .....	134
FIGURA D.33. PROPIEDADES DE LA PRIMITIVA “\$P_WAGON” DEL ELEMENTO CUERPO “WAGON”. DISPLAY.....	135
FIGURA D.34. CAMBIO DE LA POSICIÓN LONGITUDINAL EN EL WAGON.....	135
FIGURA D.35. CREACIÓN DE MARCADORES EN EL WAGON.....	136
FIGURA D.36. UNIÓN DE LOS MARCADORES DEL WAGON A LOS CABEZALES FIJOS DE LOS BOGIES .....	137
FIGURA D.37. MODELO DE VEHÍCULO COMPLETO .....	137
FIGURA D.38. PRECARGA.....	138





# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. MARCADORES EN LA SUBESTRUCTURA “JUEGO DE RUEDAS” WS.....	110
TABLA 2. VALORES DE LA POSICIÓN LONGITUDINAL EN LOS JUEGO DE RUEDA .....	113
TABLA 3. VALORES DE LOS MARCADORES DEL ELEMENTO CUERPO “BOGIE” .....	118
TABLA 4. VALORES DE LOS MARCADORES DEL ELEMENTO CUERPO “DUMMY” .....	122
TABLA 5. MARCADORES EN EL WAGON .....	136



# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Introducción

Actualmente, los vehículos ferroviarios forman parte de la vida cotidiana de la gran mayoría de las personas, tratándose de un medio de vida para algunos y un medio de transporte para otros. Este medio de transporte utiliza unos raíles que le sirven de guía para realizar un simple trayecto de un punto a otro del mapa geográfico. Durante ese trayecto, el terreno por el que se mueve el vehículo ferroviario ha sido modificado mediante grandes proyectos ingenieriles para que presente una estructura plana [1]. No obstante, pequeñas irregularidades en el camino pueden presentarse a lo largo dicho trayecto, haciendo que el vehículo ferroviario se desplace.

El sistema de suspensión de un vehículo proporciona las características de confort y maniobrabilidad necesarias para mantener controlado las perturbaciones del trayecto. Por un lado, aísla el chasis de las irregularidades del terreno, reduciendo así la fuerza transmitida al pasajero. Por otro lado, regula el movimiento vertical de la rueda y asegura el contacto entre la rueda y el terreno para mantener la maniobrabilidad de la dirección y evitar daños al vehículo o al camino.

De las diferentes partes de las que está formado un vehículo ferroviario, la suspensión es uno de los componentes fundamentales, sobre todo desde el punto de vista del confort y la seguridad. Ya sea en el transporte de mercancías, donde mantener la estabilidad en la carrocería podría suponer evitar graves accidentes, o en el transporte de pasajeros, donde dicha estabilidad juega un papel muy importante tanto en su confort como en su propia seguridad [2]. Si una suspensión no se encuentra diseñada de manera correcta o no cumple sus funciones satisfactoriamente, las probabilidades de accidente se multiplican de manera exponencial.

Una suspensión consta de una serie de dispositivos encargados de unir las masas suspendidas y no suspendidas de un vehículo, es decir, sirve de enlace entre el chasis de la carrocería y las ruedas. Dependiendo de la configuración de la propia suspensión, éste puede llegar a regularse a lo largo del trayecto

para mejorar las condiciones del vehículo ferroviario. Desde el punto de vista del funcionamiento, se puede clasificar una suspensión en tres grupos, atendiendo a esta diferenciación: suspensión pasiva, suspensión semi-activa y suspensión activa.

En un principio, los primeros diseños utilizados en vehículos fueron las suspensiones pasivas, los cuales recurren únicamente a dispositivos del tipo mecánico en los que sus propiedades no pueden ser variadas una vez son instaladas. Este tipo de suspensiones se diseñaban únicamente atendiendo al concepto de rigidez. O bien se diseñaban suspensiones blandas, idóneas para obtener confort para los pasajeros pero sacrificando la estabilidad, o bien, se trata de alcanzar el máximo control del vehículo, perdiendo confort, mediante el diseño de suspensiones rígidas.

Para tratar de encontrar un equilibrio en el sistema de suspensión debido a las perturbaciones que se pueden encontrar durante el trayecto, nacieron las configuraciones activa y semi-activa. La primera, suspensión activa, sustituye todo el conjunto mecánico de la suspensión pasiva, muelle más amortiguador, por actuadores que actúan de manera independiente en cada rueda a partir de las señales recibidas por el controlador. Por otro lado, la suspensión semi-activa cuenta con sistemas electrónicos capaces de variar las propiedades de los elementos mecánicos o de actuadores que trabajen de forma paralela al muelle y amortiguador, limitando el desplazamiento de forma que se incremente la seguridad de los ocupantes, o disminuyendo las aceleraciones verticales, y, por consiguiente, aumentando el confort.

Se observa por tanto, que el principal punto de desarrollo de las suspensiones se centra en el estudio y optimización de suspensiones activas y semi-activas. Dichos tipos de suspensiones necesitan para su funcionamiento de la información recogida por los distintos sensores repartidos por el vehículo y que les proporcionan principalmente dos condiciones para el cálculo: la aceleración vertical del vehículo (de la masa suspendida), y desplazamiento vertical de la suspensión.

La aceleración vertical afecta a la comodidad en marcha del vehículo. Se presentan bajos valores de aceleración para los casos de suspensiones blandas y mayores valores cuando se trata de suspensiones rígidas,

disminuyéndose el confort. En cuanto al desplazamiento, este repercute en el hecho de que una suspensión cuenta con un espacio limitado de operación dentro del vehículo.

Para el control de los sistemas de suspensión activa y semi-activa se comenzaron a utilizar teorías de optimización lineal, sin embargo, este tipo de controladores presentaban como desventaja que no contaban con retroalimentación, de modo que, no podían recibir información acerca de las condiciones de la carretera o de la velocidad. De esta forma, es conveniente el uso de controladores con retroalimentación como lo es el controlador óptimo LQG.

Debido a la importancia que presenta el sistema de suspensión de un vehículo ferroviario, numerosos estudios se han llevado a cabo para mejorar la eficiencia y el control de la estabilidad del tren. De esta forma, se realiza este proyecto fin de carrera, aportando un estudio completo tanto en los sistemas de suspensión como en los sistemas de control que se utilizan para la regularización de dicha suspensión; finalizando con el diseño de un controlador óptimo que ayude a minimizar los efectos que las irregularidades del camino pudieran afectar a los pasajeros de un vehículo ferroviario.

## 1.2. Objetivo

El principal objetivo es diseñar un controlador óptimo LQG, mediante el programa matemático MATLAB, que permita regular y optimizar el control de una suspensión semi-activa para un vehículo ferroviario.

Para lograr alcanzar dicho objetivo, se realizará un estudio del estado del arte tanto de la suspensión en vehículos ferroviarios como de los sistemas de control que se utilizan para regular dicha suspensión en base a las irregularidades verticales. A su vez, se deberá desarrollar el modelo analítico de un sistema de suspensión semi-activa para ajustarlos al diagrama de estados que debe regular el controlador LQG y poder realizar el diseño del controlador utilizando el lenguaje de programación de MATLAB.

### 1.3. Estructura de la memoria

La memoria se estructura en siete capítulos siendo el primero de ellos la presente introducción.

- En el segundo capítulo se describe el estado del arte de la suspensión en vehículos ferroviarios. Se detallan tres grandes grupos: suspensión según su posición, elementos de suspensión y suspensión según su configuración.
- En el tercer capítulo se realiza un estudio de los diferentes controladores que se usan para regular los sistemas de suspensión en vehículos ferroviarios.
- En el cuarto capítulo se presenta la configuración de un controlador óptimo LQG, donde se detalla el diseño de un controlador LQG y el modelo analítico de los sistemas de suspensión activa y semi-activa.
- En el quinto capítulo se presenta el diseño del controlador mediante el programa MATLAB configurado a través del modelo analítico del anterior capítulo y los resultados obtenidos del controlador diseñado.
- En el sexto capítulo se indica el modelado de un vehículo ferroviario mediante el programa de simulación SIMPACK. Se describe paso a paso el modelado de cada parte del tren.
- En el séptimo y último capítulo se detallan las conclusiones y posibles trabajos futuros.





# **Capítulo 2. Estado del arte de la suspensión en vehículos ferroviarios**

La suspensión en vehículos ferroviarios está formada por el conjunto de elementos elásticos, amortiguadores y otros elementos asociados a ellos que conectan el sistema de ruedas-eje a la carrocería del vehículo.

El objetivo principal de estos elementos es la absorción de la energía producida por las irregularidades de la vía para mantener la estabilidad del vehículo, proporcionando el máximo confort y seguridad a los pasajeros y/o carga transportada. El sistema de suspensión también es el encargado de soportar el peso del vehículo y permitir su movimiento elástico controlado sobre sus ejes.

Además, es necesario que la suspensión cumpla con otras funciones complementarias como son:

- Resistir el par motor y de frenada.
- Resistir los efectos de las curvas.
- Conservar el paralelismo de los ejes y perpendicularidad del bastidor.
- Transmitir las fuerzas de aceleración y frenada entre los ejes y el bastidor.
- Conservar el ángulo de dirección en todo el recorrido.

De esta forma, utilizando un sistema de suspensión adecuado, se debe garantizar la protección de los componentes del vehículo así como su estabilidad frente al estado de la vía y las condiciones del terreno.

Las suspensiones de los vehículos constituyen un aspecto fundamental en el diseño mecánico. En los vehículos ferroviarios, el diseño de la suspensión influye sobre la estabilidad estática y dinámica y sobre los esfuerzos entre la rueda y el raíl, tanto en la circulación en curvas como por tramos rectos.

## 2.1. Suspensión según posición

La diferencia fundamental entre los diversos tipos de suspensiones ferroviarias que existen se encuentra en la utilización o no de *bogies* [3]. Un *bogie* es un dispositivo dotado mínimo de dos ejes paralelos y solidarios entre sí, cada uno compuesto por dos ruedas, sobre los que se apoya un vagón, coche o

locomotora de un vehículo ferroviario [4]. En la Figura 2.1. se observa un ejemplo de un *bogie*.



Figura 2.1. Bogie

Generalmente, en cada vagón se suelen colocar dos *bogies*, uno en cada extremo. Sin embargo, es muy común diseñar un vehículo ferroviario donde los *bogies* se colocan en la conexión entre los coches. Esta configuración es empleada en los trenes de la empresa estatal RENFE para la serie Cercanías 446 [5] tal y como se puede apreciar en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Bogie entre coches de RENFE

El lugar donde se transportan los viajeros o mercancías se denomina caja. Por otro lado, al conjunto formado por la caja y sus correspondientes *bogies* o ejes, recibe el nombre de coche, en caso de transportar viajeros, ó vagón, en caso de transportar mercancías. La mayoría de los coches están provistos de *bogies*, aunque existen excepciones que presentan ruedas independientes en la zona de unión entre dos cajas contiguas. En el caso de los vagones, es más frecuente encontrar la caja montada directamente sobre los ejes ya que se facilitan las operaciones de mantenimiento.

Los componentes principales que conforman un *bogie* son:

- El bastidor y traviesa, que constituyen la estructura del *bogie*, los cuales transmiten las cargas y esfuerzos a los ejes.
- Dos o más sistemas “ruedas-eje”, compuesto cada uno por un eje y dos ruedas.
- Cajas de grasa, formadas por un cuerpo que aloja en su interior los rodamientos, del que salen brazos laterales sobre los que se apoyan los resortes de la suspensión primaria.
- Suspensión primaria, la cual provee la unión entre el sistema “ruedas-eje” y el bogie.
- Suspensión secundaria, se encarga de la unión entre el *bogie* y el vagón o locomotora.
- Elementos de frenado.

En la Figura 2.3. se pueden observar algunos de estos elementos y su configuración dentro de un *bogie*.

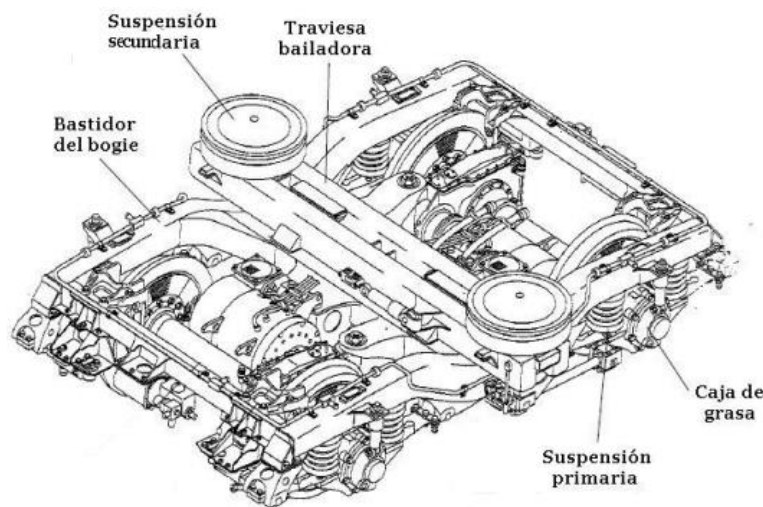


Figura 2.3. Componentes principales de un *bogie*

Las funciones principales de un *bogie* son las siguientes:

- Proporcionar estabilidad al vehículo ferroviario en tramos de vías curvas, minimizando las fuerzas centrífugas cuando se circula a alta velocidad.
- Soportar la carga de la carrocería de los vagones y locomotoras.
- Absorber las vibraciones generadas por las irregularidades del terreno.

- Garantizar el confort de la marcha minimizando la transmisión de esfuerzos y el guiado de las ruedas.

Estas funciones son principalmente solucionadas y controladas mediante el sistema de suspensión. Al utilizar *bogies* en los vehículos ferroviarios, la suspensión se realiza en dos etapas según su posición, denominados como suspensión primaria y suspensión secundaria [6]. En el siguiente esquema (Figura 2.4.) se representan los niveles de las suspensiones dentro del *bogie*.

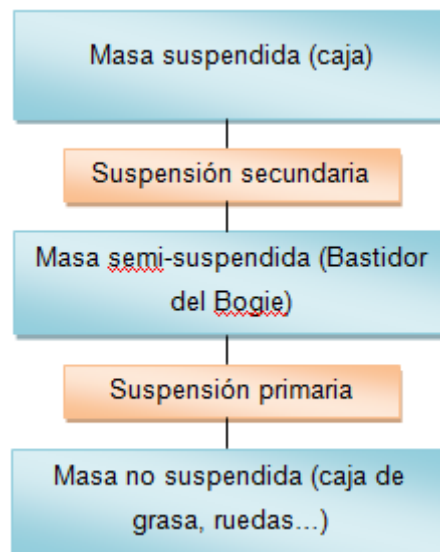


Figura 2.4. Esquema de la suspensión según la posición

### 2.1.1. Suspensión Primaria

La suspensión primaria está ubicada entre las cajas de grasa y el bastidor del *bogie* (tal y como se aprecia en la Figura 2.4.); por lo que se encuentra más próxima al plano de rodadura. Dicha suspensión desempeña dos funciones fundamentales:

- Minimizar al máximo posible las vibraciones producidas por las irregularidades del terreno que soportan el bastidor del *bogie* y los elementos montados sobre él.
- Asegurar el reparto homogéneo de cargas y esfuerzos sobre las ruedas, mejorando el comportamiento en frenado y tracción y reduciendo el riesgo de descarrilamiento.

Su actuación es principalmente como suspensión vertical, sin embargo, al estar ubicada junto a las ruedas de los ejes, otra función importante es guiar a los ejes en dirección longitudinal y lateral. Es fundamental mantener una rigidez de guiado en el comportamiento dinámico entre las ruedas y el carril cuando se pasa por una curva, tal y como se representa en la Figura 2.5.

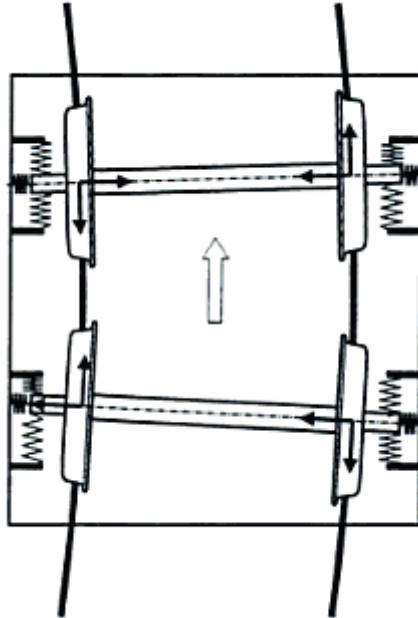


Figura 2.5. Guiado de las ruedas por parte de la suspensión primaria

En la actualidad, las velocidades que alcanzan los vehículos ferroviarios de alta velocidad, como el AVE, en España, superan los 300 km/h. Debido a esto, la estabilidad dinámica es un factor muy importante que debe ser controlada mediante la suspensión primaria.

### 2.1.2. Suspensión secundaria

Tal y como se aprecia en la Figura 2.4., la suspensión secundaria se encuentra entre el bastidor del bogie y la caja. El objetivo principal es filtrar las vibraciones tanto verticales como laterales, para que éstas no afecten a los pasajeros o la carga. De esta forma se diferencia entre suspensión secundaria vertical y suspensión secundaria lateral. En la Figura 2.6., se puede observar un ejemplo de estos dos tipos de suspensión secundaria incorporados a un *bogie* y formados por amortiguadores hidráulicos.

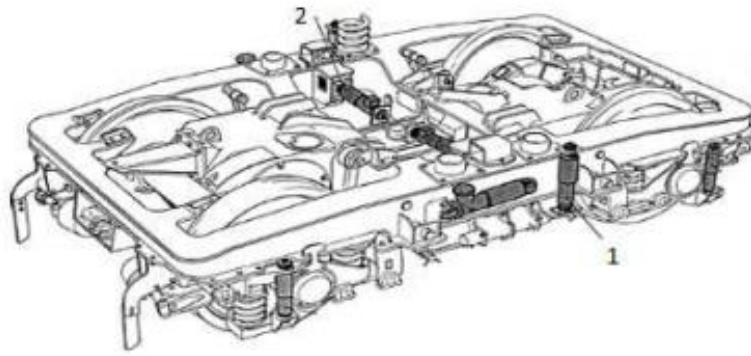


Figura 2.6. Suspensión secundaria vertical (1) y lateral (2)

Las suspensiones secundarias laterales son las encargadas de reducir los problemas de estabilidad dinámica y desplazamiento de la vía. Este movimiento puede aparecer a velocidades superiores a 120km/h, siendo condicionado, a su vez, por la estabilidad lateral que ofrezca el conjunto *caja-bogie*. Debido a ello, la mayoría de los trenes de media y larga distancia, que llegan a superar dichas velocidades, incorporan suspensiones secundarias laterales que minimicen este fenómeno.

## 2.2. Elementos que afectan a la suspensión

Los elementos que conforman la suspensión de un vehículo pueden dividirse en elementos elásticos y elementos amortiguadores. Los primeros tienen como objetivo garantizar la unión entre los raíles y el vehículo, adaptándose a las condiciones del terreno. Los elementos amortiguadores se encargan de neutralizar las oscilaciones de la masa suspendida que son producidas por los elementos elásticos [7].

### 2.2.1. Elementos elásticos

En la suspensión primaria, los elementos elásticos se encargan de ejercer una fuerza de recuperación cuando aparecen fuerzas que intentan separar los

órganos de rodaduras del vehículo ferroviario. Por otra parte, en la suspensión secundaria, estos elementos son los encargados de absorber vibraciones.

Los elementos elásticos que pueden encontrarse en la suspensión de un vehículo ferroviario son [8]:

- Ballestas.
- Resortes helicoidales.
- Suspensión neumática.
- Muelles elastómeros.
- Barras de torsión.

A continuación se describe cada uno de estos elementos.

#### 2.2.1.1. Ballestas

La suspensión de ballesta es un sistema de amortiguación empleado mayoritariamente en vehículos pesados tales como los vehículos ferroviarios. Este tipo de resorte está formado por un conjunto de láminas de acero aleado con silicio o manganeso, permitiendo que las láminas sean capaces de doblarse bajo la acción de un esfuerzo y retornando a su posición inicial una vez cesado dicho esfuerzo [9].

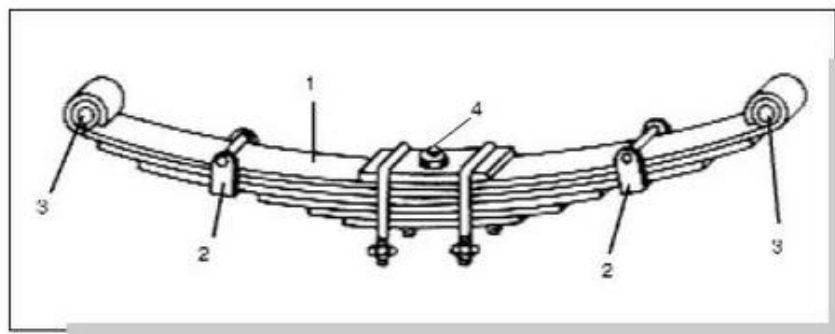


Figura 2.7. Elementos de una ballesta

Observando la Figura 2.7., la lámina más larga y situada en la parte superior de la ballesta (1) es denominada “hoja maestra”. Para mantener la alineación de las distintas hojas o láminas, durante el proceso de absorción de golpes, se dispone de varias bridas (2). Los extremos de la hoja maestra están curvados de forma que se permita la unión con el bastidor mediante unos casquillos;



estos extremos reciben el nombre de “ojos” (3). Por último, se distingue un bulón central o tornillo (4) cuya función es unir las láminas de la ballesta.

El número de hojas y su espesor van en función de la carga que han de soportar. Además, todas ellas tendrán la misma anchura y grosor salvo la hoja maestra que suele ser de mayor grosor debido a ser la encargada de resistir mayores esfuerzos producidos por los movimientos verticales y laterales de las irregularidades del terreno [10].

Debido a su gran capacidad de carga, las ballestas se emplean con mucha frecuencia en los trenes de mercancías, tal y como se puede observar en la Figura 2.8. Otras ventajas que ofrece este elemento de suspensión son: su bajo coste, amortiguamiento propio y realización de funciones de guiado tanto lateral como longitudinal.



Figura 2.8. Ballesta en un tren de mercancías.

#### 2.2.1.2. Muelles helicoidales

Los resortes o muelles helicoidales son uno de los elementos elásticos más utilizados en las suspensiones de vehículos ferroviarios. Están fabricados a partir de una varilla de acero de alta resistencia, obteniendo una forma helicoidal. Las principales ventajas de este sistema de suspensión son:

- Posibilidad de trabajar tanto a compresión como a tracción.
- Posibilidad de que el sistema sea muy compacto.

- Facilitar una regulación precisa.

La flexibilidad del muelle está en función del diámetro de la varilla utilizada (generalmente entre 10 y 15 mm), del número de espiras, del ángulo de inclinación de las mismas, de la calidad del acero empleado para su construcción y del diámetro del muelle que se obtiene una vez conseguida su forma helicoidal. Se muestran 3 ejemplos de diferentes posiciones de un muelle helicoidal en la Figura 2.9.



Figura 2.9. Posiciones de un muelle helicoidal debido a la carga que soporta.

Dentro del campo de los vehículos ferroviarios, es muy habitual el uso de resortes concéntricos en la suspensión primaria (Figura 2.10.). Esta configuración nos permite obtener una equivalencia a dos muelles helicoidales en paralelo, consiguiendo así una mayor rigidez en el sistema de suspensión.

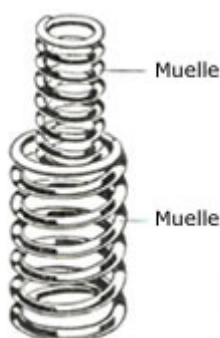


Figura 2.10. Muelles helicoidales concéntricos.

Se puede conseguir muelles con flexibilidad progresiva (como se muestra en la Figura 2.11.), utilizando diferentes diámetros de enrollado por media de formas helicoidales cónicas o por medio de un muelle con diferente paso. También se pueden utilizar los resortes concéntricos de diferentes alturas para obtener una flexibilidad progresiva.

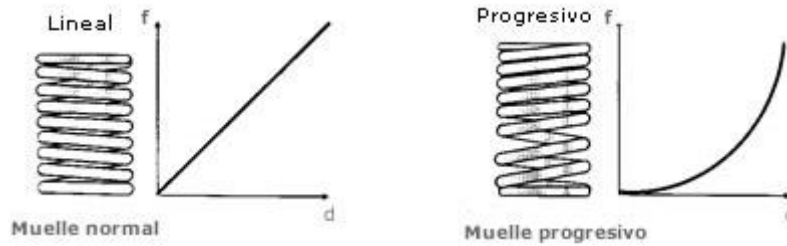


Figura 2.11. Curva de compresión (flexibilidad frente a diámetro) de un muelle normal y otro progresivo.

### 2.2.1.3. Barras de torsión

Una barra de torsión es un dispositivo que conecta los ejes de la suspensión con el fin de disminuir el ángulo de balanceo que se produce cuando el vehículo ferroviario circula por una curva. De esta forma, al disminuir dicho ángulo, se reduce la fuerza lateral que experimentan los viajeros o la carga y, por tanto, permite aumentar la velocidad de paso del tren por las curvas.

Debido a su función de nivelación en las curvas, este elemento se considera uno de los componentes más importantes en los vehículos que alcanzan altas velocidades. Las barras de torsión provocan un deslizamiento horizontal del centro de gravedad, controlando la inclinación de la masa suspendida producida entre el exterior y el interior debido a la fuerza centrífuga que se produce en las curvas.

En la Figura 2.12. se muestran dos tipos de montajes para las barras de torsión.

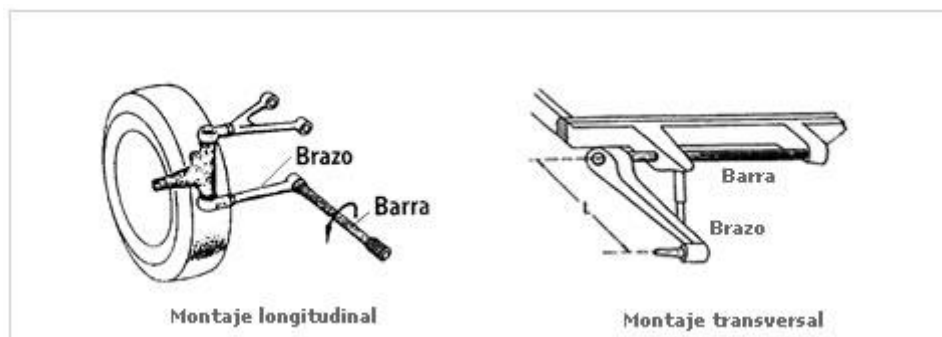


Figura 2.12. Tipos de montaje de las barras de torsión

#### 2.2.1.4. Muelles elastómeros

Se denomina muelle elastómero cuando el material no metálico del que está fabricado presenta un comportamiento elástico, de tal forma que al sufrir una deformación el muelle es capaz de recuperar su forma original.

Este tipo de material presenta una histéresis natural importante lo que resulta óptimo para evitar las vibraciones de alta frecuencia. De esta forma una de sus principales utilidades es evitar que se transmitan vibraciones sobre la caja de grasa del vehículo ferroviario, asegurando un buen enlace entre el eje y el sistema de suspensión. Utilizando este elemento se evitan problemas de fatiga por transmisión de vibraciones al eje.

Se observa un claro ejemplo de montaje de muelles elastómeros en una caja de grasa en la Figura 2.13.



Figura 2.13. Muelles elastómeros en una caja de grasa

Otras ventajas que presenta este dispositivo son:

- Evitar el desgaste de superficies por deslizamiento.
- Pueden utilizarse tanto en suspensión primaria como secundaria.
- La geometría de los muelles puede adaptarse a las necesidades del diseño.
- Presentan un bajo coste de mantenimiento.

Sin embargo, también presentan varios inconvenientes:

- Gradientes de temperatura mayores de 30°C puede producir modificaciones en la altura del muelle.
- Poseen una memoria de carga producida por un cambio de propiedades permanente por el resultado de aplicar cargas continuas.
- La histéresis elástica del muelle acaba siendo muy acusada con el paso del tiempo.

#### 2.2.1.5. Suspensión Neumática

La suspensión neumática aprovecha la compresibilidad del aire como elemento de suspensión, permitiendo su regulación mediante la presión que presente el fluido dentro.

Las principales ventajas que presenta este dispositivo son:

- Su mantenimiento es muy barato.
- El peso de este elemento es menor comparado con otros sistemas.
- La regulación de la presión del aire permite mantener fácilmente un nivel de altura constante del suelo de la caja con respecto al peso de carga que sufra.
- Gran capacidad de filtrado de altas frecuencias.
- No existe relación mecánica directa entre las ruedas y la masa suspendida por lo que se disminuye el ruido en las ruedas y frenos.

Los inconvenientes que presenta este dispositivo son:

- Deficiencia en el sistema de aire comprimido debido a una deficiencia de la balona neumática que lo contiene.
- La suspensión neumática carece de estabilidad longitudinal y transversal.
- Instalación costosa en comparación a otros sistemas de suspensión.

En la Figura 2.14. se muestra un montaje de suspensión neumática en un bogie.

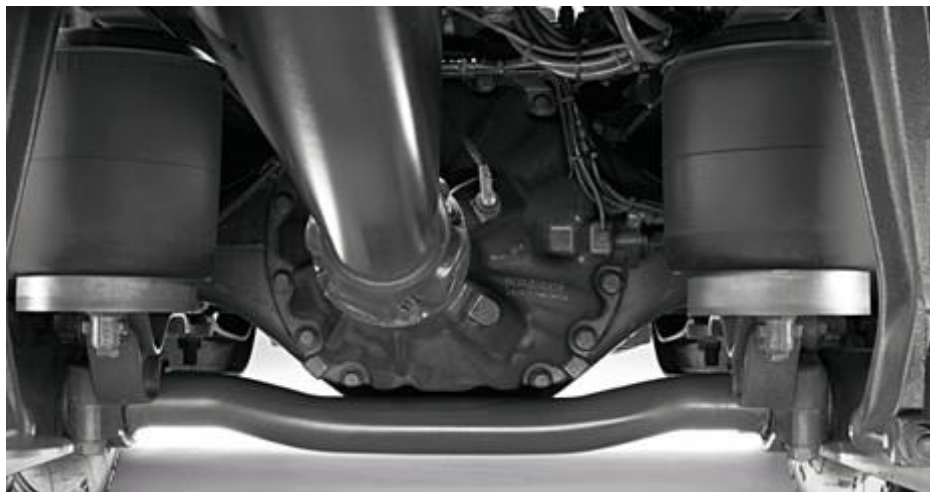


Figura 2.14. Suspensión neumática en un bogie

### 2.2.2. Elementos amortiguadores

Un elemento amortiguador consiste en neutralizar las oscilaciones producidas en los sistemas de suspensión elásticos en el menor tiempo posible. Estos elementos se encargan de absorber la energía cinética que se transmite a la masa suspendida y, así mismo, frenar las oscilaciones producidas tanto en la masa suspendida como en la masa no suspendida.

Por otro lado, desde el punto de vista de la estabilidad de un vehículo ferroviario, un elemento amortiguador tiene como misión reducir el tiempo durante el cual varía la adherencia de la rueda-carril debido a las oscilaciones producidas.

Los problemas a los que se presentan estos elementos de suspensión son los siguientes:

- El amortiguador no debe intervenir en las oscilaciones de poca amplitud y de alta frecuencia pues de lo contrario la masa suspendida estaría sometida a vibraciones sin obtenerse una mejora de la estabilidad frente a la ruta.
- Es necesario frenar simultáneamente las oscilaciones de la masa suspendida y de la masa no suspendida a fin de evitar el rebote de las ruedas, sin endurecer demasiado la suspensión puesto que las oscilaciones de estas masas son muy diferentes entre sí.

- La velocidad y aceleración de las oscilaciones son función no solo de la amplitud sino también de la frecuencia, la cual varía con el estado de la carga, por lo que se debe mantener una rigidez tal que no varíe en función de la carga de forma que la frecuencia se mantenga constante.

Los elementos amortiguadores pueden ser: de fricción, de gas, reológicos y amortiguadores hidráulicos. Siendo los más empleados los amortiguadores de fricción y los hidráulicos [11].

#### 2.2.2.1. Amortiguadores de fricción

Estos elementos basan su funcionamiento en la fricción de dos superficies; transforman la energía producida por las oscilaciones de los elementos elásticos en energía térmica, mediante rozamiento. Se muestra un ejemplo de un amortiguador de fricción en la Figura 2.15.

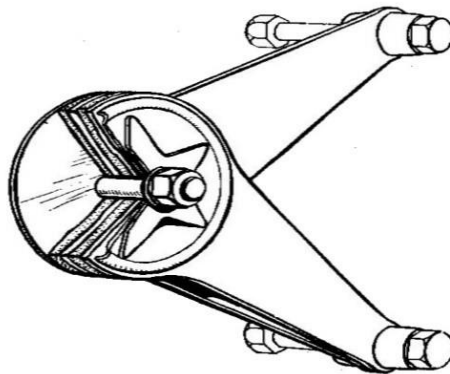


Figura 2.15. Amortiguador de fricción.

Los amortiguadores de fricción se utilizan en suspensiones de vagones de mercancías de vehículos ferroviarios debido a la simplicidad del sistema y el bajo coste que presenta. Constan de elementos de fricción a los cuales se deriva parte de la carga vertical que los comprimen. La fricción generada en estos elementos por el movimiento de la suspensión proporciona una fuerza amortiguadora.

Estos amortiguadores presentan varias desventajas en las que cabe citar que:



- Las piezas se desgastan rápidamente debido al propio concepto de rozamiento entre ellas, por lo que se deben reponer periódicamente.
- Su comportamiento se altera con el desgaste.
- Si no se supera la fuerza de fricción la suspensión permanece bloqueada y el vehículo queda sin suspensión.
- Cuando se supera la fuerza de fricción, la fuerza amortiguadora disminuye con la velocidad, cuando lo deseable es que fuera proporcional a ella.

Por otro lado, estos elementos también son utilizados, en menor medida, en los vehículos ferroviarios destinados a pasajeros, controlando el movimiento lateral y vertical del vehículo.

#### 2.2.2.4. Amortiguadores hidráulicos

Los amortiguadores hidráulicos constan de un pistón que trabaja dentro de un cilindro en el que existe aceite a ambos lados del pistón. Sobre éste, existen una serie de orificios y una válvula adicional comprimida que permite el paso de aceite de una parte a otra del pistón cuando la presión supera un valor dado.

Estos amortiguadores se han impuesto en la actualidad como uno de los elementos de suspensión más utilizados en el sector ferroviario. Una de las características más destacadas es que la fuerza amortiguadora aumenta con la velocidad, solucionando uno de los inconvenientes que presentaban los amortiguadores de fricción.

Los amortiguadores hidráulicos más utilizados en vehículos ferroviarios son los de doble tubo presurizados, cuyo fluido de trabajo es aceite; los de doble tubo no presurizados, cuyo fluido de trabajo es aceite y gas; y los monotubo presurizados. Siendo el primer tipo el más económico de ellos.

Los amortiguadores de doble tubo constan de dos cámaras: una llamada interior y otra de reserva, tal y como se muestra en la Figura 2.16.



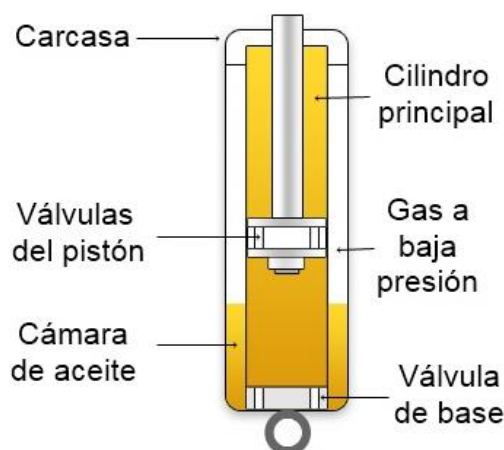


Figura 2.16. Amortiguador hidráulico de doble tubo.

Los amortiguadores presurizados tienen ciertas ventajas frente a los no presurizados, son las siguientes:

- Respuesta de la válvula más sensible para pequeñas amplitudes.
- Mejor confort de marcha.
- Mejores propiedades de amortiguación en condiciones extremas.
- Reducción de ruido hidráulico.
- Siguen operativos aunque pierdan el gas.

Por otro lado, los amortiguadores monotubo están más extendidos en vehículos de altas prestaciones y en competición. Constan de dos cámaras principales, una de aceite y otra de gas a presión, separadas por un pistón flotante, tal y como se muestra en la Figura 2.17.

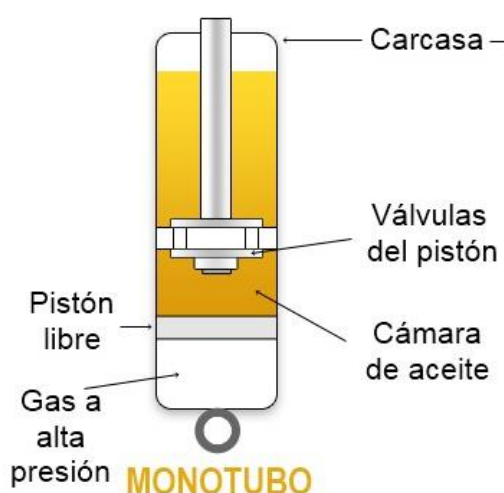


Figura 2.17. Amortiguador hidráulico monotubo.

Los amortiguadores monotubo presentan algunas ventajas con respecto a los de doble tubo:

- Buena refrigeración debido a que la cámara está en contacto directo con el aire. Esto se traduce en una mayor eficacia, pues hay que tener en cuenta que el amortiguador es un dispositivo que convierte la energía cinética en energía calorífica.
- El nivel de aceite no baja al quedar el vehículo estacionado, lo que evita funcionamientos deficientes al volver a arrancar.
- Gracias al pistón separador, no queda restringida la posición de montaje, pudiéndose colocar incluso tumbados.
- Mayor diámetro de pistón a igual diámetro de carcasa, lo que permite reducir las presiones de operación.
- Como desventajas se podrían citar las siguientes:
- Mayores costes derivados de requerimientos superiores de precisión, tolerancias de fabricación y estanqueidad del gas.
- Su mayor necesidad de espacio puede aumentar su longitud por encima de 100 mm en aplicaciones a automóviles.
- Las válvulas son de diseño más complejo que las de doble tubo.

### 2.3. Suspensión según configuración

Según el sistema de control que tenga la suspensión de los vehículos ferroviarios, se puede clasificar en:

- Suspensión pasiva.
- Suspensión activa.
- Suspensión semi-activa.

La suspensión pasiva tiene parámetros predeterminados y no es regulable automáticamente, la suspensión activa utiliza un actuador que incorpora energía para modificar la respuesta al sistema ante distintas perturbaciones del terreno y la suspensión semi-activa regula la rigidez y/o el coeficiente de amortiguamiento sin ingresar energía al sistema [12].

### 2.3.1. Suspensión pasiva

La suspensión pasiva presenta la característica de no poder cambiar sus parámetros de suspensión dependiendo del tipo de necesidad que requiera cada irregularidad de la vía. Este tipo de suspensión está formada por los elementos mencionados en el epígrafe 2.2. que no aportan energía al sistema sino que almacenan energía mediante muelles y resortes y la disipan mediante amortiguadores [13].

En un sistema con esta suspensión se presentan problemas de confort o maniobrabilidad al no poder adecuarse a las condiciones del terreno. A pesar de este gran inconveniente, es la suspensión más utilizada en los vehículos ferroviarios.

Se muestra el esquema de suspensión pasiva en la Figura 2.18 [14].

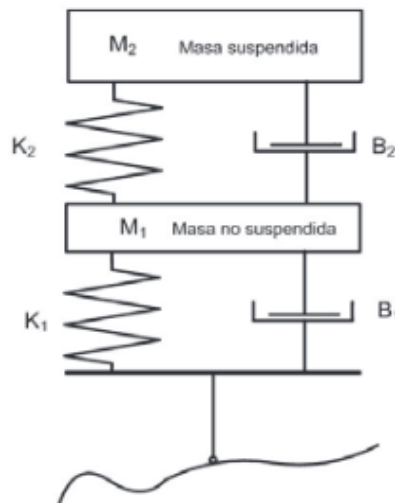


Figura 2.18. Esquema de suspensión pasiva

### 2.3.2. Suspensión activa

Una suspensión activa almacena, disipa e introduce energía al sistema por medio de actuadores, cuyo accionar es regulado a través de sensores y controladores. Para ejercer la fuerza de control se pueden utilizar actuadores

neumáticos, electromagnéticos o electro-hidráulicos, tal y como se muestra en el esquema de la Figura 2.19 [14].

Se emplean sensores para registrar el comportamiento del vehículo ante las perturbaciones del terreno y se envían los datos a un ordenador desde donde, en función de dichos parámetros, éste envía las órdenes de forma independiente a cada uno de los amortiguadores, variando así su dureza.

Con este sistema de suspensión se consigue:

- un mejor contacto con el suelo.
- una mejora de estabilidad
- una mejor adherencia del vehículo independientemente de las condiciones del terreno.
- reducción de esfuerzos rueda-carril, vibraciones y centrado del vehículo en las curvas.

Sin embargo, debido a su elevado coste y a la necesidad de incorporar motores de gran potencia capaces de proporcionar la energía necesaria de funcionamiento a los actuadores, el sistema de suspensión activa no está tan extendido como el sistema de suspensión pasiva [15] y [16].

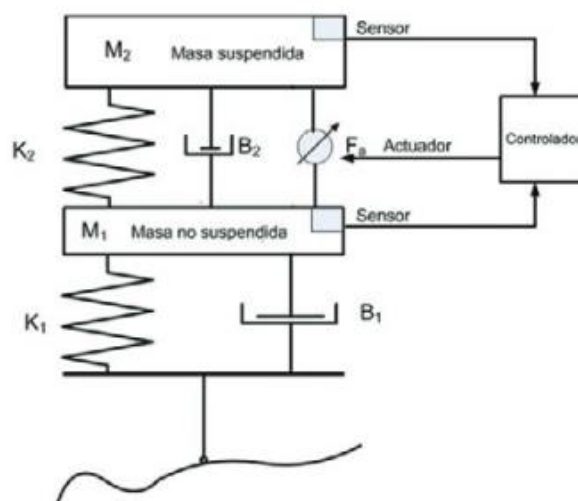


Figura 2.19. Esquema de suspensión activa

### 2.3.3. Suspensión semi-activa

El sistema de suspensión semi-activa se caracteriza por tener amortiguadores cuyo coeficiente de amortiguamiento es modificado por un controlador externo. En la Figura 2.20. [14] se muestra el esquema de dicha suspensión. Generalmente, estas suspensiones controlan las frecuencias bajas con elementos activos y las frecuencias altas con elementos pasivos.

Con respecto a las variables para el control de la suspensión semi-activa, se puede considerar la relación de posición, la caída de presión en una trayectoria, la velocidad relativa de la suspensión o la velocidad absoluta de la masa suspendida [17].

La suspensión semi-activa es aplicable usualmente en vehículos ligeros; asimismo, su rendimiento en trenes es comparable al de una suspensión activa y permite controlar su movimiento lateral.

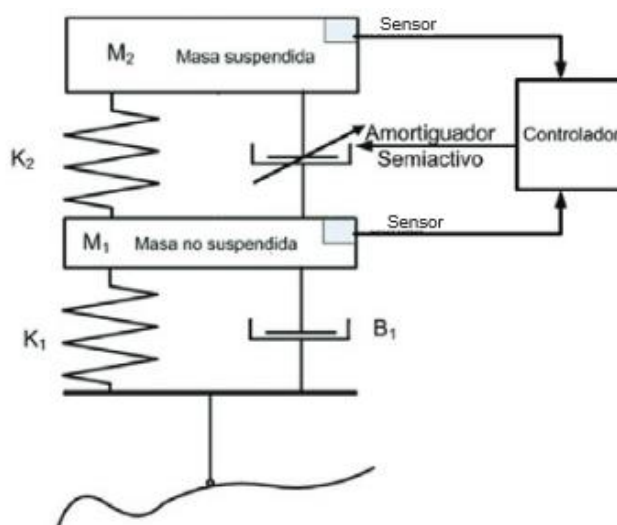


Figura 2.20. Esquema de suspensión semi-activa

Dos de los tipos de amortiguadores semi-activos más representativos en vehículos ferroviarios son:

- Amortiguadores magnetorreológicos.
- Amortiguadores electrorreológicos.

Los primeros tienen la peculiaridad de que su respuesta varía en función del campo magnético aplicado. Por otro lado, los amortiguadores electrorreológicos son de respuesta variable en función con el campo eléctrico aplicado. De esta

forma, un fluido dentro de un amortiguador es capaz de cambiar su densidad y, por consiguiente, el comportamiento del amortiguador, dependiendo de la intensidad del campo eléctrico o magnético que se le aplique (las moléculas de dicho fluido se comportarán de una manera u otra dependiendo del campo que se le aplique, Figura 2.21.) [18].

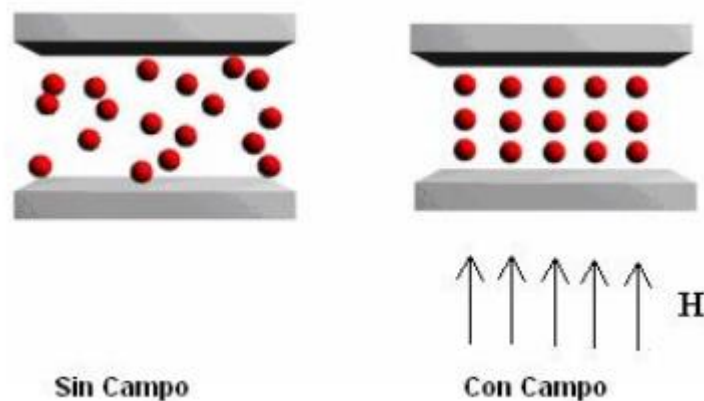


Figura 2.21. Comportamiento de las moléculas dentro de un amortiguador

# **Capítulo 3. Control de los sistemas de suspensión en vehículos ferroviarios**

La elección del controlador más adecuado es uno de los principales desafíos en el diseño de una suspensión activa o semi-activa. Los principales objetivos de control que se buscan en una suspensión son:

- mejorar la maniobrabilidad
- incrementar el confort
- reducir la potencia para el controlador.

Asimismo, en una suspensión real hay que considerar problemas de no linealidades como, por ejemplo:

- fricción de Coulomb
- histéresis
- zonas muertas
- saturaciones

Para la solución de estos problemas se aplican metodologías de control convencional y de técnicas de inteligencia artificial. Las metodologías de control convencional basan su diseño en un modelo matemático del sistema, mientras que las metodologías de control inteligencia artificial se utilizan para resolver el principal problema de tratar con sistemas complejos y multivariables. La suspensión en un vehículo ferroviario real encaja mejor en esta última metodología, ya que su comportamiento es no lineal y aporta incertidumbres e imprecisiones.

Por un lado, los principales controladores convencionales encargados de solucionar los problemas encontrados en la suspensión de un vehículo ferroviario son:

- Controlador óptimo
- Controlador proporcional, integral y derivativo (PID)
- Controlador por modos deslizantes
- Controlador adaptativo
- Controlador skyhook y groundhook
- Controlador robusto

Por otro lado, los principales controladores de inteligencia artificial son:



- Controlador por redes neuronales
- Controlador de lógica borrosa
- Controlador basado en algoritmos evolutivos y bioinspirados

### 3.1. Estado del arte de los controladores convencionales

A continuación se detallan los principales controladores convencionales que se utilizan actualmente en la suspensión de vehículos:

#### 3.1.1. Controlador óptimo (LQR y LQG)

Esta metodología persigue la optimización de un controlador que satisface las restricciones dadas por las ecuaciones de estado y el criterio de desempeño deseado. Su uso se recomienda cuando el comportamiento del sistema tiene incertidumbres y se clasifica en dos tipos:

Regulador lineal cuadrático (LQR – *Linear Quadratic Regulator*), cuando un sistema lineal utiliza una función cuadrática en la optimización. En el caso del sistema de suspensión, la incertidumbre está asociada a la rugosidad del camino y las restricciones se caracterizan en el índice de rendimiento usando las medias cuadráticas de la aceleración de la masa suspendida y la desviación de la suspensión.

Controlador lineal cuadrático gaussiano (LQG – *Linear Quadratic Gaussian*), es la combinación de un LQR con un filtro Kalman (LQE – *Linear Quadratic Estimator*) que determina estadísticamente el ruido y se considera un buen estimador de estados. Se caracteriza por ser predictivo y es aplicado para dinámicas complicadas, multivariantes o inestables. Utiliza un modelo optimizado del sistema para predecir su comportamiento y la señal de control futura a emplear. También se puede usar un modelo basado en redes neuronales para predecir la aceleración vertical del vehículo.

#### 3.1.1.1. Estimador de Kalman

El filtro de Kalman es un conjunto de ecuaciones matemáticas que proveen una solución recursiva eficiente del método de mínimos cuadrados. Esta solución permite calcular un estimador lineal, insesgado y óptimo del estado de un proceso en cada momento del tiempo con base en la información disponible en el momento  $t-1$ , y actualizar, con la información adicional disponible en el momento  $t$ , dichas estimaciones [19]. Este filtro es el principal algoritmo para estimar sistemas dinámicos especificados en la forma de estado-espacio.

El filtro de Kalman proporciona un buen marco para la estimación de una variable, de la que se dispone de medidas a lo largo del tiempo. Se trata de una técnica de estimación *Bayesiana* empleada para seguir sistemas estocásticos dinámicos observados mediante sensores ruidosos.

En el ámbito de la Visión Artificial el filtro de Kalman es un algoritmo recursivo que se utiliza para estimar la posición de un punto o característica en movimiento y la incertidumbre de la medida, en la siguiente posición. Se trata de buscar la característica (punto, borde, esquina, región, etc.) en un área determinada de la siguiente imagen alrededor de la posición predicha, en la que estamos seguros de encontrar la característica dentro de un cierto grado de confianza.

El objetivo del filtro es la obtención de un estimador óptimo de las variables de estado de un sistema dinámico, basado en observaciones ruidosas y en un modelo de incertidumbre de la dinámica del sistema.

La descripción del filtro de Kalman con sus ecuaciones puede verse en el siguiente diagrama de la Figura 3.1.

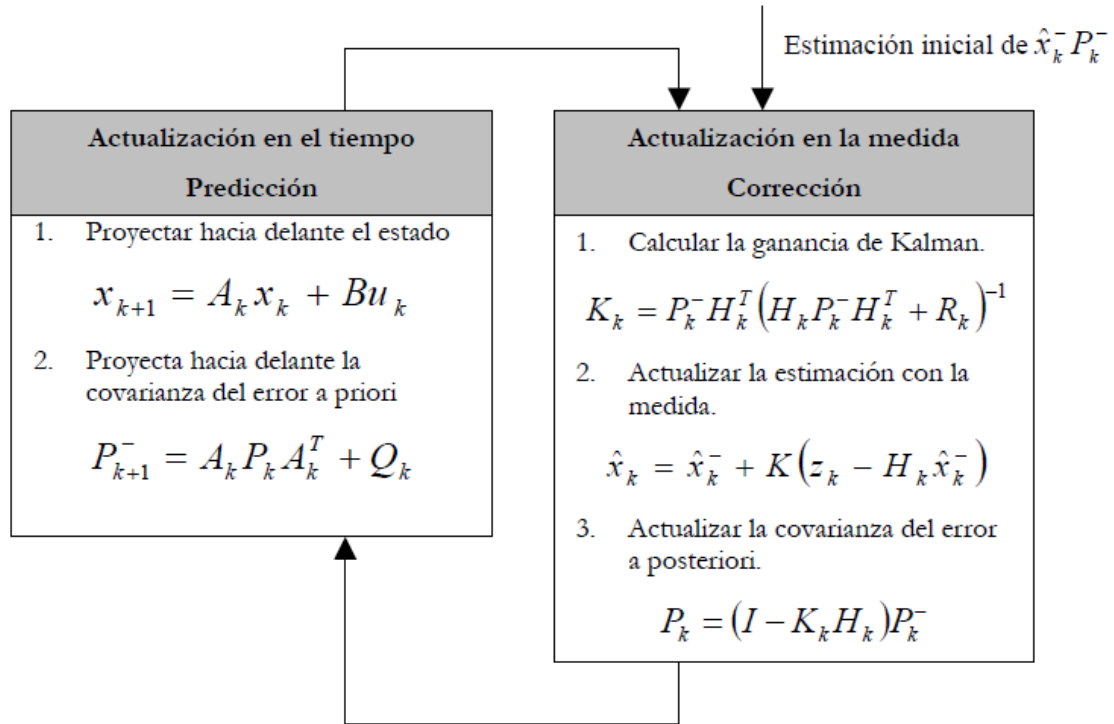


Figura 3.1. Diagrama de la descripción del filtro de Kalman.

### 3.1.2. Controlador proporcional, integral y derivativo (PID)

El controlador PID es un sistema de lazo cerrado que usa la señal de error dada por la diferencia entre la entrada deseada y la salida real del sistema. Tiene como ventaja que se obtiene una respuesta y compensación rápida de la señal de error frente a perturbaciones [20]. El ajuste de los tres parámetros del controlador PID es crítico para evitar oscilaciones del sistema y puede ser realizado por aproximaciones teóricas, por optimización considerando las ganancias como factores de diseño y por heurística usando control borroso para una auto-regulación en línea [21]. También se ha propuesto el uso de controladores PID con doble realimentación: una interna para el control de fuerza y otra externa para el control de la carrera de la suspensión.

La estructura de un controlador PID en lazo cerrado se representa en la Figura 3.2.

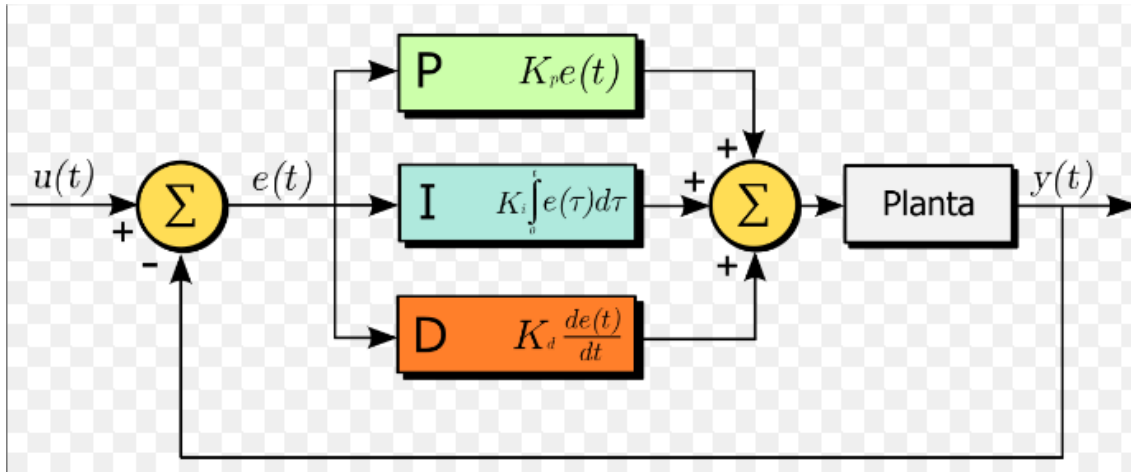


Figura 3.2. Controlador PID en lazo cerrado

### 3.1.3. Controlador por modos deslizantes

El control por modos deslizantes se caracteriza por su robustez e insensibilidad a las perturbaciones. De esta forma, cuando se presenta un cambio en los parámetros del vehículo, éste no afecta al rendimiento de una suspensión activa, lográndose un incremento en el confort al disminuir el movimiento del *bogie*. Este controlador es efectivo en la reducción de las vibraciones. Sin embargo, presenta el inconveniente de oscilar a altas frecuencias (*chattering*) y para evitarlo se suele combinar con el controlador skyhook, explicado en más detalle en el epígrafe 3.1.5.

### 3.1.4. Controlador adaptativo

El control adaptativo permite ajustar automáticamente sus características para operar óptimamente en un medio ambiente cambiante, reduciendo las perturbaciones y la vibración del vehículo a niveles especificados. Los más representativos son:

- Auto-ajustables, ya que emulan el comportamiento dinámico optimizando el confort para el estado dado, considerando la carga dinámica y la deflexión en la suspensión.

- Un esquema borroso con habilidad de aprendizaje en línea para compensar el error de aproximación funcional permite diseñar el controlador adaptativo sin requerir el modelo dinámico del sistema. También se puede autorregular el factor de escala de salida de un control borroso de acuerdo a la tendencia del proceso.
- Con modelo de referencia, que permiten reducir la perturbación y la vibración a niveles “ideales” [22].

El modelo puede expresarse en forma de red neuronal. No obstante, cuando el sistema de suspensión está compuesto de actuadores hidráulicos su comportamiento es no lineal y variable con el tiempo, siendo difícil la construcción de un controlador basado en modelos.

### 3.1.5. Controlador skyhook y groundhook

El control skyhook está basado en un amortiguador ficticio instalado entre el chasis y un “cielo” estacionario, siendo utilizado en el control de suspensiones semi-activas. El confort lo proporciona al reducir la aceleración de la masa suspendida, pero con limitaciones en la maniobrabilidad.

Para superar esta restricción se propone el control groundhook, que usa al terreno como referencia estacionaria del amortiguador regulable. Por consiguiente, se reduce la fuerza transmitida al terreno mejorando la maniobrabilidad en desmedro del confort [23]. El uso combinado de estas técnicas permite aprovechar ambas características.

### 3.1.6. Controlador robusto

El control robusto busca aproximar el modelo de la planta física real por uno lineal de coeficientes constantes, asumiendo que se incurrirá en un error de modelado que se utiliza en el diseño del controlador. Así, el control robusto permite incorporar la sensibilidad humana a la vibración en rangos diferentes

de frecuencias [24]. El controlador robusto asegura un buen rechazo al ruido por medio de algoritmos aleatorios

## 3.2. Estado del arte de los controladores de inteligencia artificial

A continuación se detallan los principales controladores de inteligencia artificial:

### 3.2.1. Controlador por redes neuronales

La utilización de redes neuronales hace posible el uso de sensores económicos en el diseño del sistema de control. A partir de modelos neuronales se pueden obtener algoritmos de entrenamiento supervisados y no supervisados. Su funcionalidad es demostrada por la aplicación a sistemas de suspensión semi-activa sin requerir de un conocimiento completo de la dinámica del sistema. Una red neuronal puede ser entrenada para controlar sistemas de suspensión activos-semi-activos y consigue [25]:

- Emular un controlador existente.
- Realizar un control adaptativo combinando una red para el regulador y otra para el modelo de referencia.
- Controlar un sistema no modelado a través de una función de rendimiento elegida adecuadamente y de una señal de error.
- Ajustar los parámetros de aprendizaje de la red con un método de corrección y predicción.

### 3.2.2. Controlador de lógica borrosa

El control lógico borroso (FLC) usa variables lingüísticas y la teoría de conjuntos borrosos para formar algoritmos de control capaces de emular la

lógica humana, sin necesidad de una exacta descripción del sistema [26]. Esta técnica permite realizar un control adaptable mediante mínimos cuadrados de la fuerza del actuador, realizar variantes no lineales del algoritmo PID, obtener las reglas borrosas usando como variables de entrada combinaciones lineales de velocidades y el desplazamiento del cuerpo del vehículo, determinar el FLC por la información de la superficie de rodadura futura, generar el coeficiente de amortiguamiento con un reducido número de reglas borrosas y mejorar la estabilidad del sistema mediante una jerarquía de reglas borrosas [27], [28] y [29].

### 3.2.3. Controlador basado en algoritmos evolutivos y bioinspirados

Se aplican en la solución de problemas de optimización multi-objetivos para un amplio rango de aplicaciones. Generalmente, son procesos estocásticos de búsqueda y reducen el espacio de soluciones de manera eficiente. Sin embargo, no se recomiendan para aplicaciones en línea y en sistemas críticos. Los más utilizados son: Los algoritmos genéticos están basados en la evolución natural y la genética.

Permiten mejorar el rendimiento mediante la elección de los factores de peso en una estrategia multi-objetivo y para perfeccionar las matrices de peso de un regulador lineal cuadrático LQR. Los criterios de rendimiento se pueden optimizar mediante diferentes filtros usando la deflexión de la suspensión, la deflexión del neumático y las aceleraciones. Además, se puede considerar en la función objetivo la restricción de la carrera máxima. La integración de algoritmos genéticos con una representación mediante los gráficos de ligaduras ha facilitado la síntesis del control considerando perturbaciones del terreno y de carga. La combinación con métodos determinísticos ha sido propuesta para la optimización del modelo completo del sistema de suspensión de un vehículo.

La optimización por enjambre de partículas (PSO) es un algoritmo de optimización bio-inspirado basado en el comportamiento de bandadas de aves y cardúmenes de peces. Tiene una rápida convergencia con menor tiempo de

cálculo que los algoritmos genéticos. En combinación con un FLC disminuye la aceleración de la masa suspendida a pesar de las irregularidades del terreno y en combinación con una estrategia adaptativa permite incluir la restricción de la sensibilidad humana a la frecuencia.

El recocido simulado es un algoritmo de optimización global inspirado en el proceso de recocido, el cual permite variar las propiedades físicas del acero y la cerámica. Esta técnica tiene un rendimiento similar a los algoritmos genéticos y logra considerar simultáneamente el modelo dinámico (suspensión y dirección) y su control integrado mejorando la maniobrabilidad, el confort y la estabilidad del vehículo.



# **Capítulo 4. Configuración de un controlador LQG**

En este contexto, surge como opción promisoría el uso de estrategias de controladores LQG (Linear Quadratic Gaussian), ya que agrupan la resolución de un objetivo de control óptimo con la estimación robusta de estados.

#### 4.1. Diseño de un controlador LQG

La ley de control empleada en este trabajo es conocida como LQR (del inglés *Linear Quadratic Regulator*) y su variante LQG (*Linear Quadratic Gaussian*) debido a la consideración de ruidos de distribución espectral gaussiana afectando el lazo de control. Las principales hipótesis en el uso de esta estrategia de control consisten en considerar el sistema en estudio mediante su modelo matemático lineal y en utilizar modelos de ruido estocásticos (ruidos de medición y perturbaciones del sistema) con propiedades estadísticas conocidas [30].

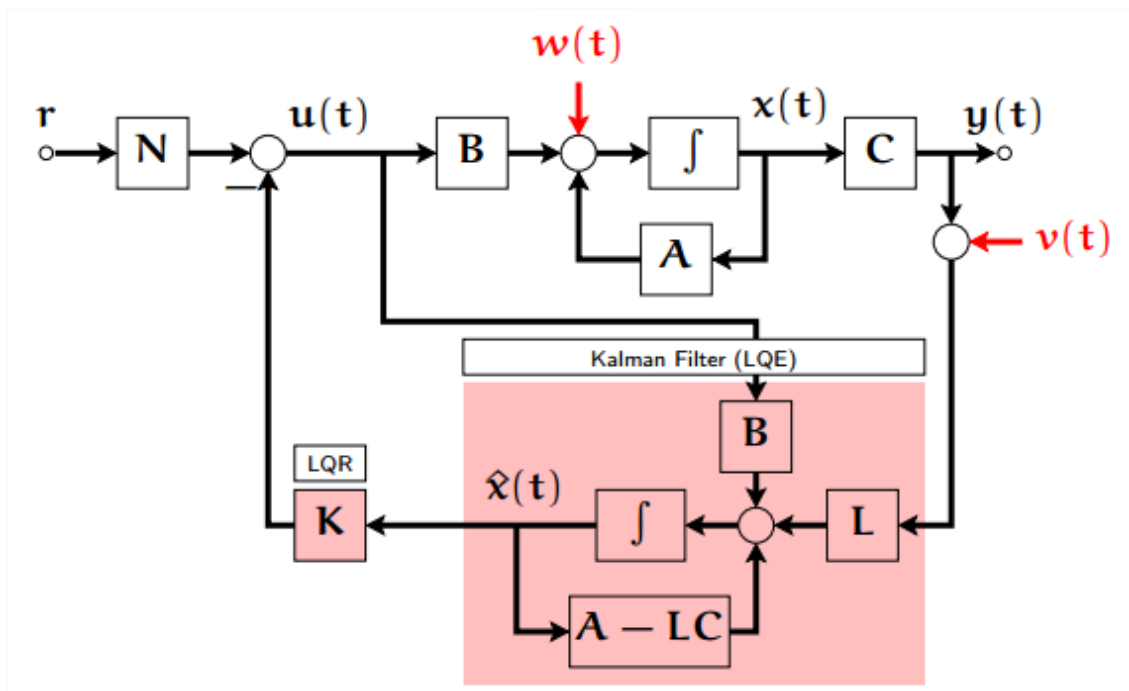


Figura 4.1. Diagrama de un controlador LQG

Por tanto, la expresión del modelo lineal del sistema, obtenida mediante un procedimiento previo de linealización a partir del modelo no lineal (véase Figura 4.1.) es escrita como:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu + Gw \\ y &= Cx + v_p\end{aligned}$$

(Ecuación 1)

Donde  $x$  corresponde al vector de estados,  $u$  corresponde al vector de señales de entrada (variables manipuladas o controles),  $y$  corresponde al vector de variables de salida,  $w$  corresponde al vector de perturbaciones, y finalmente  $v_p$  corresponde al vector de ruidos de medición. Las matrices  $A$ ,  $B$ ,  $G$  y  $C$  corresponden a las matrices de los sistemas de dimensiones apropiadas. El propósito de la estrategia de control consiste en encontrar el vector óptimo de señales de control  $u(t)$  tal que se minimice la función de coste:

$$J = E \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (x^T Q x + u^T R u) dt \right\}$$

(Ecuación 2)

donde las matrices de sintonía  $Q$  y  $R$  son seleccionadas apropiadamente cumpliendo las condiciones de diseño. Las matrices  $Q$  y  $R$  son conocidas como matrices de penalización de estado y entrada, respectivamente. Ellas se encargan de dar prioridad bien sea al seguimiento de una trayectoria por parte de los estados o a la penalización de la energía de control requerida por el sistema para alcanzar los objetivos de control deseados. La solución del problema de control LQG, es decir, hallar el  $u(t)$  óptimo, consiste en la determinación de una ganancia estabilizante  $K$ , la cual se aplica al sistema mediante una ley de realimentación de estado expresada como:

$$u(t) = -K_r x(t)$$

(Ecuación 3)

Donde  $K_r$  es la matriz de ganancia del controlador.

Con el fin de calcular la matriz  $K_r$ , es necesario disponer de la medición de todo el vector de estado, lo cual no siempre es posible. Sin embargo, es posible diseñar un observador de estados a partir de las mediciones de las salidas de la planta. Este sistema auxiliar se encarga de estimar las trayectorias del sistema con un error y velocidad de convergencia dados mediante el parámetro de diseño  $K_e$ , el cual es conocido como la ganancia de estimación. Nótese que

los diseños del controlador y el observador pueden ser realizados independientemente. Sin embargo, pueden ser combinados en el diseño final de la arquitectura de control. Por otro lado, a fin de mejorar la regulación del sistema, es posible agregar al esquema en lazo cerrado un estado dado por un integrador. Esto permite que el error de estado estacionario tienda a cero y, por lo tanto, que la salida de la planta siga más precisamente a la señal de referencia. Así, el diseño de la ley LQR implica la obtención de una ganancia  $K_r$  considerando la variable adicional relacionada con el integrador.

## 4.2. Modelado de un controlador LQG

Para el modelado de los amortiguadores se han propuesto técnicas que ponen el acento en las no-linealidades, lo que resulta relevante para los sistemas semi-activos.

El número de grados de libertad del modelo del sistema de suspensión está en función del tipo de análisis a realizar. Así, el modelo de un cuarto de vehículo tiene dos grados de libertad, lo que lo restringe al estudio de la dinámica vertical. Para considerar el cabeceo se utiliza el modelo de mitad de vehículo con cuatro grados de libertad y para incorporar las características anti-vuelco y anti-derrape se requiere del modelo completo del vehículo con siete grados de libertad. Además, para incluir la dinámica vertical del asiento se utiliza un modelo completo con ocho grados de libertad.

El modelo de un cuarto de vehículo es generalmente usado para el análisis teórico y diseño del sistema de suspensión activa. Este modelo ofrece una representación adecuada del problema de controlar las variaciones de carga en las ruedas y las fuerzas en el sistema de suspensión.

### 4.2.1. Modelo analítico de un sistema de suspensión activa

Los diagramas de las fuerzas que actúan en un sistema de suspensión activa se muestran en la Figura 4.2 [31].

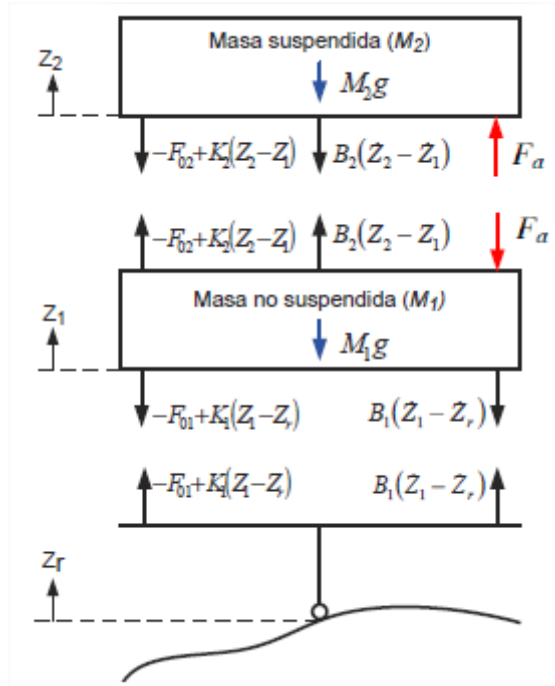


Figura 4.2. Modelo de un cuarto de vehículo

Las variables que intervienen en el movimiento representan: las irregularidades del camino  $Z_r$ , el desplazamiento vertical del neumático  $Z_1$ , el desplazamiento vertical del chasis  $Z_2$  y la fuerza del actuador  $F_a$ .

Cuando el sistema se encuentra en la posición de equilibrio, los amortiguadores tienen fuerzas iniciales  $F_{01}$  y  $F_{02}$  dadas por:

$$F_{01} = (M_2 + M_1)g$$

$$F_{02} = M_2g$$

(Ecuación 4)

donde  $g$  representa la aceleración de la gravedad.

Se aplica la segunda ley de Newton a las masas suspendida y no suspendida, mostradas en la Figura 4.2.:

$$M_2 \ddot{Z}_2 = F_a - B_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) - (-F_{02} + K_2(Z_2 - Z_1)) - M_2g$$

(Ecuación 5)

$$M_1 \ddot{Z}_1 = -F_a + B_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) + (-F_{02} + K_2(Z_2 - Z_1)) - M_1g - B_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_r) - (-F_{01} + K_1(Z_1 - Z_r))$$

(Ecuación 6)

Considerando (4) al simplificar (5) y (6) se eliminan las fuerzas gravitacionales:

$$M_2 \ddot{Z}_2 = F_a - B_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) - K_2(Z_2 - Z_1)$$

(Ecuación 7)

$$M_1 \ddot{Z}_1 = -F_a + B_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) + K_2(Z_2 - Z_1) - B_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_r) - K_1(Z_1 - Z_r)$$

(Ecuación 8)

Debido a los inconvenientes sobre los sistemas de suspensión activa explicados en el epígrafe 2.3.2., únicamente se detalla el sistema de ecuaciones que regula dicha suspensión, centrando el estudio de este proyecto en los sistemas de suspensión semi-activa.

#### 4.2.2. Modelo analítico de un sistema de suspensión semi-activa

En este estudio, se ha diseñado un modelo analítico de nueve grados de libertad para un vehículo ferroviario. Este modelo, que se muestra en las Figuras 4.3. y 4.4 [32], consta de una carrocería, dos *bogies* y cuatro ruedas por *bogie*. Los conjuntos de ruedas y los *bogies* están conectados por un sistema de suspensión primaria que consiste en muelles y amortiguadores viscosos. Los *bogies* y carrocería están conectados por un sistema de suspensión secundaria que consiste en resortes y amortiguadores tanto magnetorreológicos como electrorreológicos (desde ahora se denotan como "MRD" para la dirección vertical, y "PD" para la dirección horizontal, tal y como se muestra en las Figuras 4.3. y 4.4.) [33].

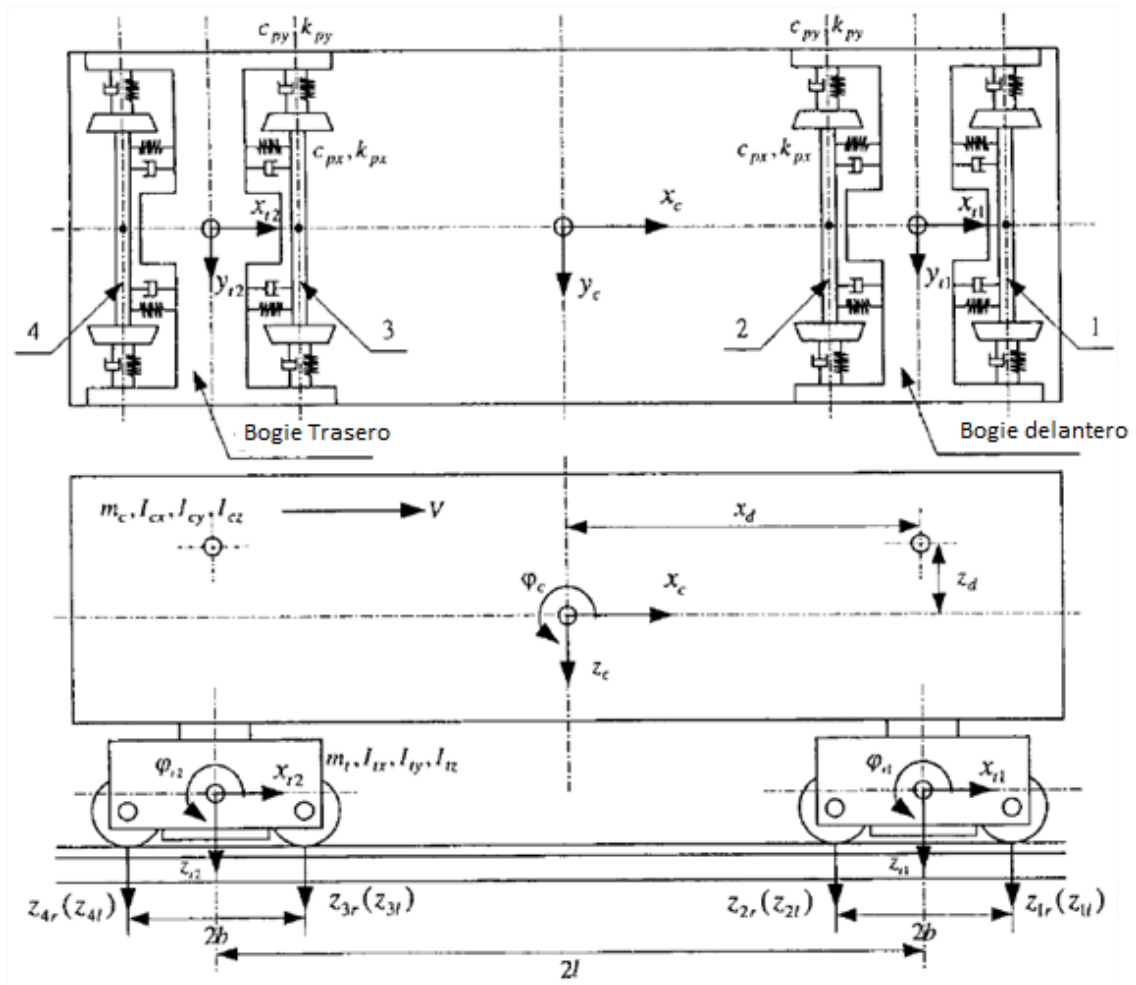


Figura 4.3. Vistas desde abajo y lateral de un modelo de vehículo ferroviario de 9 grados de libertad.

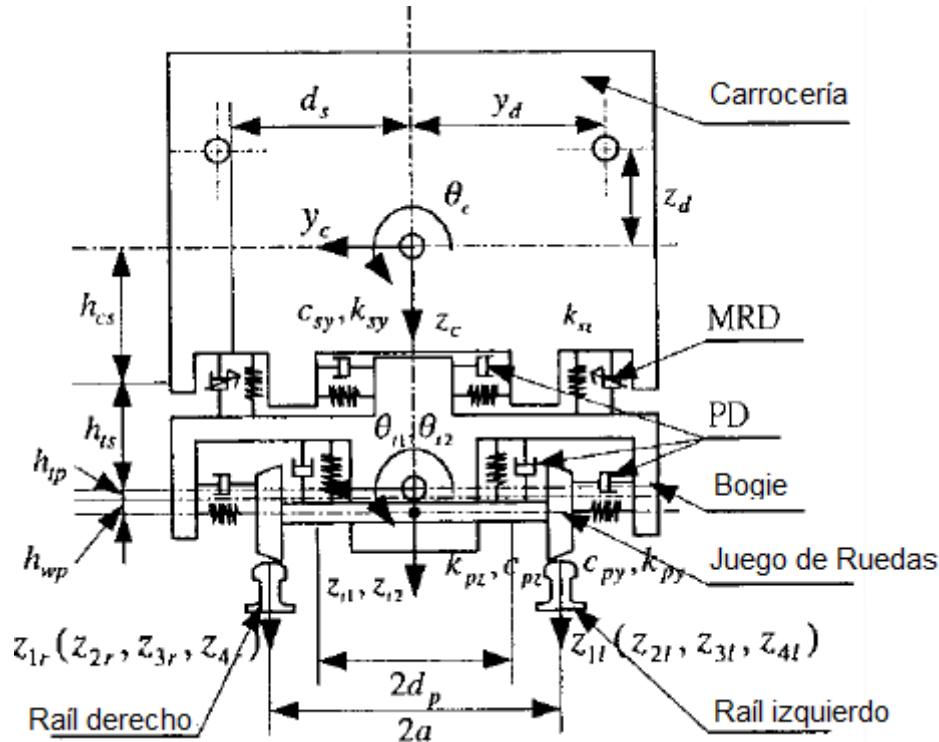


Figura 4.4. Vista frontal de un modelo de vehículo ferroviario de 9 grados de libertad.

Para la configuración de la suspensión semi-activa del tren se diseña el esquema de la Figura 4.5. donde se utilizan cuatro MRD como sustitución de los amortiguadores verticales viscosos entre la carrocería y el *bogie*. Los MRD se utilizan para controlar las vibraciones verticales, de paso y de balanceo. Se colocan verticalmente en los lados izquierdo y derecho de cada *bogie* (denotados como  $MRD_{szlr}$ ,  $MRD_{szll}$ ,  $MRD_{sztr}$  y  $MRD_{sztl}$  respectivamente en la Figura 4.5.). Con el fin de realizar el control de realimentación, se deben utilizar acelerómetros para medir las aceleraciones de la carrocería y los *bogies*, instalados en las direcciones vertical y horizontal como se muestra en la Figura 4.5.



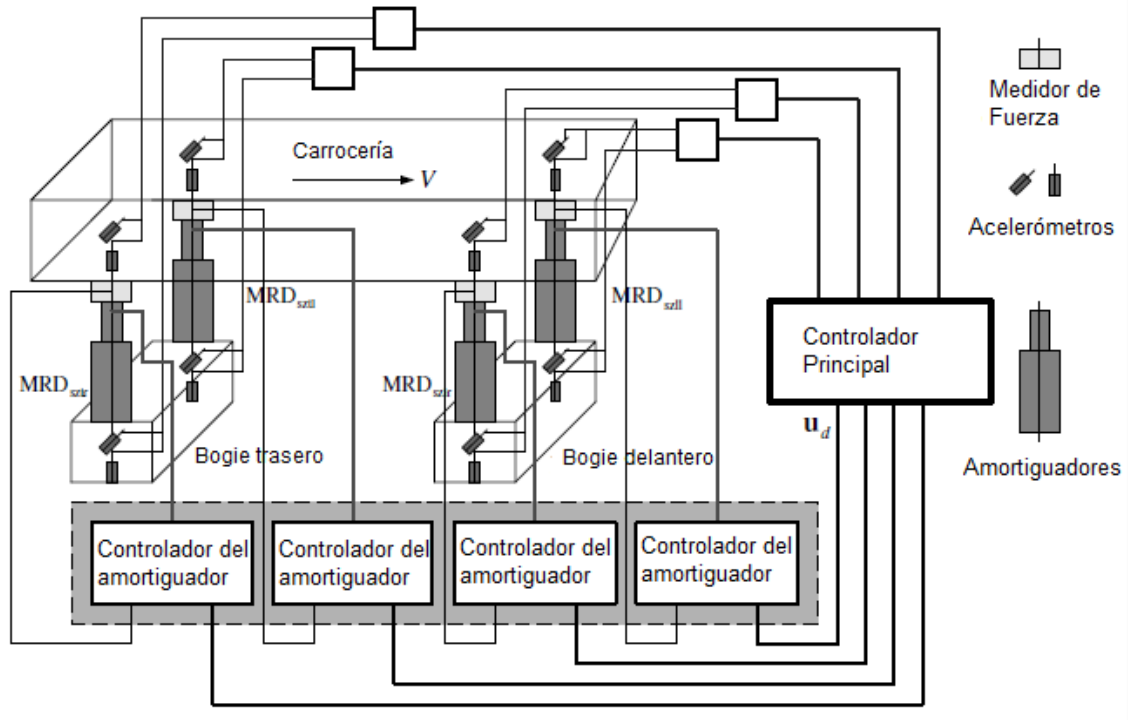


Figura 4.5. Esquema de control para un sistema de suspensión semi-activo

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento del vehículo ferroviario con sistemas de suspensión semi-activo se obtienen empleando las Leyes de Newton y las nomenclaturas que se detallan en el Anexo A. Las ecuaciones para la carrocería (dirección vertical  $z_c$ , cabeceo  $\varphi_c$ , y balanceo  $\theta_c$ ) pueden expresarse como:

$$m_c \ddot{z}_c = F_{szlr} + F_{szll} + F_{sztr} + F_{sztl} + f_{szlr} + f_{szll} + f_{sztr} + f_{sztl} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$I_{cy} \ddot{\varphi}_c = (F_{sxlr} + F_{sxll})h_{cs} + (F_{sxtr} + F_{sxtl})h_{cs} - (F_{szlr} + F_{szll})l + (F_{sztr} + F_{sztl})l - (f_{szlr} + f_{szll})l + (f_{sztr} + f_{sztl})l \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$I_{cx} \ddot{\theta}_c = -(F_{sylyr} + F_{sylyl})h_{cs} - (F_{sytyr} + F_{sytyl})h_{cs} + (F_{szlr} + F_{sztr})d_s - (F_{szll} + F_{sztl})d_s + (f_{szlr} + f_{sztr})d_s - (f_{szll} + f_{sztl})d_s \quad (\text{Ecuación 11})$$

Las ecuaciones del bogie delantero (dirección vertical  $z_{t1}$ , cabeceo  $\varphi_{t1}$ , y balanceo  $\theta_{t1}$ ) pueden expresarse como:

$$m_t \ddot{z}_{t1} = -(F_{szlr} + F_{szll}) + (F_{pz1r} + F_{pz2r}) + (F_{pz1l} + F_{pz2l}) - (f_{szlr} + f_{szll}) \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$I_{ty}\ddot{\phi}_{t1} = (F_{sxlr} + F_{sxll})h_{ts} + (F_{px1r} + F_{px1l})h_{tp} + (F_{px2r} + F_{px2l})h_{tp} - (F_{pz1r} + F_{pz1l})b + (F_{pz2r} + F_{pz2l})b$$

(Ecuación 13)

$$I_{tx}\ddot{\theta}_{t1} = -(F_{sy1r} + F_{sy1l})h_{ts} - (F_{sz1r} - F_{sz1l})d_s - (F_{py1r} + F_{py2r})h_{tp} - (F_{py1l} + F_{py2l})h_{tp} + (F_{pz1r} + F_{pz2r})d_p - (F_{pz1l} + F_{pz2l})d_p - (f_{sz1r} - f_{sz1l})d_s$$

(Ecuación 14)

Las ecuaciones del bogie trasero (dirección vertical  $z_{t1}$ , cabeceo  $\phi_{t1}$ , y balanceo  $\theta_{t1}$ ) pueden expresarse como:

$$m_t\ddot{z}_{t2} = -(F_{sztr} + F_{sztl}) + (F_{pz3r} + F_{pz4r}) + (F_{pz3l} + F_{pz4l}) - (f_{sztr} + f_{sztl})$$

(Ecuación 15)

$$I_{ty}\ddot{\phi}_{t2} = (F_{sxtr} + F_{sxtl})h_{ts} + (F_{px3r} + F_{px3l})h_{tp} + (F_{px4r} + F_{px4l})h_{tp} - (F_{pz3r} + F_{pz3l})b + (F_{pz4r} + F_{pz4l})b$$

(Ecuación 16)

$$I_{tx}\ddot{\theta}_{t2} = -(F_{sytr} + F_{sytl})h_{ts} - (F_{sztr} - F_{sztl})d_s - (F_{py3r} + F_{py4r})h_{tp} - (F_{py3l} + F_{py4l})h_{tp} + (F_{pz3r} + F_{pz4r})d_p - (F_{pz3l} + F_{pz4l})d_p - (f_{sztr} - f_{sztl})d_s$$

(Ecuación 17)

Donde:

- $F$  con diferentes subíndices en las ecuaciones (9) - (17) representan las fuerzas de suspensión producidas por las suspensiones primarias y secundarias. Las definiciones de  $F$  en las ecuaciones (9) - (17) se enumeran en el Anexo B.
- $f_{szlr}$ ,  $f_{szll}$ ,  $f_{sztr}$  y  $f_{sztl}$  representan las fuerzas de amortiguación producidas por los correspondientes amortiguadores  $MRD_{szlr}$ ,  $MRD_{szll}$ ,  $MRD_{sztr}$  y  $MRD_{sztl}$ , que se ilustran en la figura 4.5.

En los subíndices de  $F$  y  $f$ , la primera letra ("p" o "s") se utiliza para representar a las suspensiones primarias y secundarias respectivamente. La segunda letra de los subíndices ("x", "y" o "z") representan la direcciones de las fuerzas de suspensión y amortiguación. El tercer carácter ("l", "t", "1-4") identifica si se

hace referencia al bogie delantero ("l") o trasero ("t") o si hace referencia a los conjuntos de ruedas ("1-4"). La última letra de los subíndices ("r" o "l") se utiliza para identificar el lado derecho o izquierdo, respectivamente, del sistema de suspensión para la correspondiente fuerza.

Siendo:

$$q = [z_c \varphi_c \theta_c z_{t1} \varphi_{t1} \theta_{t1} z_{t2} \varphi_{t2} \theta_{t2}]$$

(Ecuación 18)

Las ecuaciones (9) - (17) del vehículo ferroviario usando amortiguadores magnetorreológicos pueden ser escritas en forma vectorial de la siguiente forma:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F_u u + F_w w$$

(Ecuación 19)

Donde  $M$ ,  $C$  y  $K$  son las matrices de masa, amortiguación y rigidez respectivamente; estas matrices son de tamaño  $9 \times 9$ :  $M \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$ ,  $C \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$  y  $K \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$ .  $u$  es el vector de fuerzas de control producido por los amortiguadores:  $u = [f_{szlr} f_{szll} f_{sztr} f_{sztl}]$ .  $w$  es el vector de perturbaciones generado por las irregularidades del camino ( $z_{ij}$ , representadas en las figuras 4.3 y 4.4, donde  $i$  indica el juego de ruedas y  $j$  la posición derecha o izquierda):  $w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix}$   $w_1 = [z_{1r} z_{1l} z_{2r} z_{2l} z_{3r} z_{3l} z_{4r} z_{4l}]$ ,  $w_2 = [\dot{z}_{1r} \dot{z}_{1l} \dot{z}_{2r} \dot{z}_{2l} \dot{z}_{3r} \dot{z}_{3l} \dot{z}_{4r} \dot{z}_{4l}]$ .  $F_u$  y  $F_w$  son las matrices de coeficientes del vector de fuerzas de control de los amortiguadores y el vector de perturbaciones, respectivamente.

Si consideramos el vector de estados:  $x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix}$ , la ecuación (19) puede ser reescrita en el espacio de estados como:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu(t) + Gw(t) \\ y = C_0 x + DU(t) + Hw(t) + v \end{cases}$$

(Ecuación 20)

Donde:

- $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$ ,  $A \in \mathbb{R}^{18 \times 18}$ ;
- $B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}F_u \end{bmatrix}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{18 \times 4}$ ;

- $G = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}F_w \end{bmatrix}$ ,  $G \in \mathbb{R}^{18 \times 16}$ ;
- $C_0 = [-M^{-1}K \quad -M^{-1}C]$ ,  $G \in \mathbb{R}^{9 \times 18}$ ;
- $D = M^{-1}F_u$ ,  $D \in \mathbb{R}^{9 \times 4}$ ;
- $H = M^{-1}F_w$ ,  $H \in \mathbb{R}^{9 \times 16}$ ;
- $y$  es el vector de la salida;
- $v$  es el vector del sensor de ruido.

# **Capítulo 5. Implementación y Resultados**

## 5.1. Software utilizado (MATLAB)

MATLAB (abreviatura de *MATrix LABoratory*, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las *cajas de herramientas (toolboxes)*; y las de Simulink con los *paquetes de bloques (blocksets)*.

Se utiliza para aprendizaje automático, procesamiento de señales, procesamiento de imágenes, visión artificial, comunicaciones, finanzas computacionales, diseño de control, robótica.

La plataforma de MATLAB está optimizada para resolver problemas de ingeniería y científicos. El lenguaje de MATLAB, basado en matrices, es la forma más natural del mundo para expresar las matemáticas computacionales. Los gráficos integrados facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos.

El código MATLAB se puede integrar con otros lenguajes, lo que le permite desplegar algoritmos y aplicaciones en sistemas web, empresariales o de producción.

## 5.2. Diseño de un controlador LQG en MATLAB

Se configura el siguiente controlador LQG en MATLAB a partir del modelo analítico de un sistema de suspensión semi-activa empleando las ecuaciones descritas en el epígrafe 4.2.1.2.:

*%Controlador LQG*

*clear all;*

*clc;*

*%Declaración de variables SISTEMA PASIVO*

*mc = 3.96e4;*

*lcx = 8.85e4;*

*lcy = 2.46e6;*

*mt = 3.25e3;*

*ltx = 3.06e3;*

*lty = 3.02e3;*

*ksx = 1.5e5;*

*csx = 0;*

*ksy = 1.5e5;*

*csy = 5e4;*

*hcs = 1.207;*

*hts = 0.217;*

*l = 9;*

*ds = 1;*

*ksz = 2.9e5;*

*csz = 0.0; %csz = 8e4;*

*kpx = 4e6;*

*kpy = 3.25e6;*

```
htp = -0.425;
```

```
kpz = 7e5;
```

```
b = 1.25;
```

```
dp = 1;
```

```
cpz = 1.5e4;
```

```
a = 0.7465;
```

```
cpx = 0;
```

```
cpy = 0;
```

```
%Matriz M
```

```
% Es una matriz diagonal 9x9
```

```
M = [mc zeros(1,8); 0 lcy zeros(1,7); 0 0 lcx zeros(1,6); 0 0 0 mt zeros(1,5);  
zeros(1,4) lty zeros(1,4); zeros(1,5) ltx 0 0 0; zeros(1,6) mt 0 0;  
zeros(1,7) lty 0; zeros(1,8) ltx];
```

```
%Matriz K
```

```
% Matriz 9x9
```

```
K1 = [(-4*ksz) 0 0 (2*ksz) 0 0 (2*ksz) 0 0];
```

```
K2 = [0 -((4*ksx*(hcs^2)) + 4*(l^2)*ksz) 0 -(2*l*ksz) -(2*hcs*hts*ksx) 0 -(2*l*ksz)  
-(2*hcs*hts*ksx) 0];
```

```
K3 = [0 0 -((4*ksy*(hcs^2)) + (4*ksz*(ds^2))) 0 0 ((2*ksz*(ds^2)) -  
(2*ksy*hts*hcs)) 0 0 ((2*ksz*(ds^2)) - (2*ksy*hts*hcs))];
```

```
K4 = [2*ksz -2*ksz*l 0 -(4*kpz + 2*ksz) 0 0 0 0 0];
```

```
K5 = [0 -((2*ksx*hcs*hts)) 0 0 -(2*ksx*(hts^2) + 4*kpx*(htp^2) + 4*(b^2)*kpz) 0 0  
0 0];
```

```
K6 = [0 0 (2*(ds^2)*ksz - 2*ksy*hcs*hts) 0 0 -((4*htp^2*kpy) + (4*dp^2*kpz) +  
(2*ds^2*ksz) + (2*(hts^2)*ksy)) 0 0 0];
```

```
K7 = [2*ksz -2*ksz*l 0 0 0 0 -(2*ksz + 4*kpz) 0 0];
```

```
K8 = [0 -((2*ksx*hcs*hts)) 0 0 0 0 0 -(2*ksx*(hts^2) + 4*kpx*(htp^2) +  
4*(b^2)*kpz) 0];
```



$$K9 = [0 \ 0 \ (2*(ds^2)*ksz - 2*ksy*hcs*hts) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -((4*htp^2*kpy) + (4*dp^2*kpz) + (2*ds^2*ksz) + (2*(hts^2)*ksy))];$$

$$K = [K1; K2; K3; K4; K5; K6; K7; K8; K9];$$

*%Matriz C*

*% Matriz 9x9*

$$C1 = [(-4*csz) \ 0 \ 0 \ (2*csz) \ 0 \ 0 \ (2*csz) \ 0 \ 0];$$

$$C2 = [0 \ -((4*csx*(hcs^2)) + (4*(l^2)*csz)) \ 0 \ -(2*l*csz) \ -(2*hcs*hts*csx) \ 0 \ -(2*l*csz) \ -(2*hcs*hts*csx) \ 0];$$

$$C3 = [0 \ 0 \ -((4*csy*(hcs^2)) + ((4*csz*(ds^2)))) \ 0 \ 0 \ ((2*csz*(ds^2)) - (2*csy*hts*hcs)) \ 0 \ 0 \ ((2*csz*(ds^2)) - (2*csy*hts*hcs))];$$

$$C4 = [2*csz \ -2*csz*l \ 0 \ -(4*cpz + 2*csz) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$C5 = [0 \ -((2*csx*hcs*hts)) \ 0 \ 0 \ -(2*csx*(hts^2) + 4*cpx*(htp^2) + 4*(b^2)*cpz) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$C6 = [0 \ 0 \ (2*(ds^2)*csz - 2*csy*hcs*hts) \ 0 \ 0 \ -((4*htp^2*cpy) + (4*dp^2*cpz) + (2*ds^2*csz) + (2*(hts^2)*csy)) \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$C7 = [2*csz \ -2*csz*l \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -(2*csz + 4*cpz) \ 0 \ 0];$$

$$C8 = [0 \ -(2*csx*hcs*hts) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -(2*csx*(hts^2) + 4*cpx*(htp^2) + 4*(b^2)*cpz) \ 0];$$

$$C9 = [0 \ 0 \ (2*(ds^2)*csz - 2*csy*hcs*hts) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -((4*htp^2*cpy) + (4*dp^2*cpz) + (2*ds^2*csz) + (2*(hts^2)*csy))];$$

$$C = [C1; C2; C3; C4; C5; C6; C7; C8; C9];$$

*%Matriz Fu*

*% Matriz 9x4*

$$Fu = [1 \ 1 \ 1 \ 1; \ -l \ -l \ l \ l; \ ds \ -ds \ ds \ -ds; \ -1 \ -1 \ 0 \ 0; \ zeros(1,4); \ -ds \ +ds \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ -1 \ -1; \ zeros(1,4); \ 0 \ 0 \ -ds \ +ds];$$

*%Matriz Fw**% Matriz 9x16 (primeras 3 filas son 0)*

```

Fw = [zeros(3,16); dp*kpz/a dp*kpz/a dp*kpz/a dp*kpz/a zeros(1,4) dp*cpz/a
dp*cpz/a dp*cpz/a dp*cpz/a zeros(1,4);
      -b*dp*kpz/a -b*dp*kpz/a b*dp*kpz/a b*dp*kpz/a zeros(1,4) -b*dp*cpz/a -
b*dp*cpz/a b*dp*cpz/a b*dp*cpz/a zeros(1,4);
      (dp^2)*kpz/a -(dp^2)*kpz/a (dp^2)*kpz/a -(dp^2)*kpz/a zeros(1,4)
(dp^2)*cpz/a -(dp^2)*cpz/a (dp^2)*cpz/a -(dp^2)*cpz/a zeros(1,4);
zeros(1,4) dp*kpz/a dp*kpz/a dp*kpz/a dp*kpz/a zeros(1,4) dp*cpz/a dp*cpz/a
dp*cpz/a dp*cpz/a;
zeros(1,4) -b*dp*kpz/a -b*dp*kpz/a b*dp*kpz/a b*dp*kpz/a zeros(1,4) -
b*dp*cpz/a -b*dp*cpz/a b*dp*cpz/a b*dp*cpz/a;
zeros(1,4) (dp^2)*kpz/a -(dp^2)*kpz/a (dp^2)*kpz/a -(dp^2)*kpz/a zeros(1,4)
(dp^2)*cpz/a -(dp^2)*cpz/a (dp^2)*cpz/a -(dp^2)*cpz/a];

```

*%Inversa de M**% Matriz de 9x9*

```

Minv = inv(M);

```

*%Matrices A, C0, B, G, D y H*

```

Ac = [zeros(9) eye(9); (Minv*K) (Minv*C)];
C0 = [(Minv*K) (Minv*C)];
B0 = [zeros(9,4); Minv*Fu];
G = [zeros(9,16); Minv*Fw];
B = [B0 G];
D0 = Minv*Fu;
H = Minv*Fw;
D = [D0 H];

SISTEMA_P = ss(Ac,B,C0,D); % x' = Ac*x + Bu; y = C0x Du

```

$SISTEMA\_D\_P = c2d(SISTEMA\_P, 0.001);$  % Discretiza SISTEMA\_P con  $T_s = 0.001s$

$Ad\_P = SISTEMA\_D\_P.a;$

$Bd\_P = SISTEMA\_D\_P.b;$

$Cd\_P = SISTEMA\_D\_P.c;$

$Dd\_P = SISTEMA\_D\_P.d;$

$X = \text{zeros}(18, 1);$

*% Parámetros irregularidad*

$L = 25;$  %Rail lenght m

$V = 55.56;$  %Velocidad m/s

$A = 25.4/(2*1000);$  %Factor escalar

$\omega = (2*\pi)/L;$  %Frecuencia espacial rad/m

*% Parámetros de la EDO*

$F_s = 1e3;$

$T_s = 1/F_s;$

$Tiempo = 0:T_s:5;$  %segundos

$distancia = V*Tiempo;$  %metros

*% -----Irregularidad delantera delantera-----*

$z1R = ((4*A)/\pi)*((1/3*\cos(\omega*distancia)) - (1/15*\cos(2*\omega*distancia)) + (1/35*\cos(3*\omega*distancia)));$

$z1L = z1R;$

*% -----Irregularidad delantera trasera-----*

$irregularidad1 = z1R.';$

```
irregularidad2 = delayseq(irregularidad1,(2*b/V),Fs);
```

```
z2R = irregularidad2.');
```

```
z2L = z2R;
```

```
%-----Irregularidad trasera delantera-----
```

```
irregularidad3 = delayseq(irregularidad1,(2*l/V),Fs);
```

```
z3R = irregularidad3.');
```

```
z3L = z3R;
```

```
%-----Irregularidad trasera trasera-----
```

```
irregularidad4 = delayseq(irregularidad1,(2*(b+l)/V),Fs);
```

```
z4R = irregularidad4.');
```

```
z4L = z4R;
```

```
%Velocidades de irregularidad
```

```
v1R(1) = 0;
```

```
v2R(1) = 0;
```

```
v3R(1) = 0;
```

```
v4R(1) = 0;
```

```
for i = 1:(length(Tiempo)-1)
```

```
    v1R(i+1) = (z1R(i+1) - z1R(i))/(1/Fs);
```

```
    v2R(i+1) = (z2R(i+1) - z2R(i))/(1/Fs);
```

```
    v3R(i+1) = (z3R(i+1) - z3R(i))/(1/Fs);
```

```
    v4R(i+1) = (z4R(i+1) - z4R(i))/(1/Fs);
```

```
end
```

```
v1L = v1R;
```

```
v2L = v2R;
```

*v3L = v3R;*

*v4L = v4R;*

*usfr = zeros(1,5001);*

*usfl = zeros(1,5001);*

*usrr = zeros(1,5001);*

*usrl = zeros(1,5001);*

*entradas =[usfr;usfl;usrr;usrl;z1R; z1L; z2R; z2L; z3R; z3L; z4R; z4L; v1R; v1L;  
v2R; v2L; v3R; v3L; v4R; v4L];*

*x0 =zeros(1,18);*

*salidas\_P = lsim(SISTEMA\_P, entradas, Tiempo, x0);*

*salidas\_discreto\_P = lsim(SISTEMA\_D\_P, entradas, Tiempo, x0);*

*count = 1;*

*%valores iniciales*

*x\_real = x0';*

*X=x0';*

*P = eye(18);*

*Is=eye(18);*

*count = 1;*

*%Declaración de variables SISTEMA ACTIVO*

*mc = 3.96e4;*

*lcx = 8.85e4;*

*lcy* = 2.46e6;

*mt* = 3.25e3;

*ltx* = 3.06e3;

*lty* = 3.02e3;

*ksx* = 1.5e5;

*csx* = 0;

*ksy* = 1.5e5;

*csy* = 5e4;

*hcs* = 1.207;

*hts* = 0.217;

*l* = 9;

*ds* = 1;

*ksz* = 2.9e5;

*csz* = 0.0;

*kpx* = 4e6;

*kpy* = 3.25e6;

*htp* = -0.425;

*kpz* = 7e5;

*b* = 1.25;

*dp* = 1;

*cpz* = 1.5e4;

*a* = 0.7465;

*cpx* = 0;

*cpy* = 0;

*%Matriz M*

*M* = [*mc* zeros(1,8); 0 *lcy* zeros(1,7); 0 0 *lcx* zeros(1,6); 0 0 0 *mt* zeros(1,5);  
zeros(1,4) *lty* zeros(1,4); zeros(1,5) *ltx* 0 0 0; zeros(1,6) *mt* 0 0; zeros(1,7) *lty* 0;  
zeros(1,8) *ltx*];

### %Matriz K

```

K1 = [(-4*ksz) 0 0 (2*ksz) 0 0 (2*ksz) 0 0];
K2 = [0 -((4*ksx*(hcs^2)) + 4*(l^2)*ksz) 0 -(2*l*ksz) -(2*hcs*hts*ksx) 0 -(2*l*ksz)
-(2*hcs*hts*ksx) 0];
K3 = [0 0 -((4*ksy*(hcs^2)) + (4*ksz*(ds^2))) 0 0 ((2*ksz*(ds^2)) -
(2*ksy*hts*hcs)) 0 0 ((2*ksz*(ds^2)) - (2*ksy*hts*hcs))];
K4 = [2*ksz -2*ksz*l 0 -(4*kpz + 2*ksz) 0 0 0 0];
K5 = [0 -((2*ksx*hcs*hts)) 0 0 -(2*ksx*(hts^2) + 4*kpx*(htp^2) + 4*(b^2)*kpz) 0 0
0 0];
K6 = [0 0 (2*(ds^2)*ksz - 2*ksy*hcs*hts) 0 0 -((4*htp^2*kpy) + (4*dp^2*kpz) +
(2*ds^2*ksz) + (2*(hts^2)*ksy)) 0 0 0];
K7 = [2*ksz -2*ksz*l 0 0 0 0 -(2*ksz + 4*kpz) 0 0];
K8 = [0 -((2*ksx*hcs*hts)) 0 0 0 0 0 -(2*ksx*(hts^2) + 4*kpx*(htp^2) +
4*(b^2)*kpz) 0];
K9 = [0 0 (2*(ds^2)*ksz - 2*ksy*hcs*hts) 0 0 0 0 0 -((4*htp^2*kpy) +
(4*dp^2*kpz) + (2*ds^2*ksz) + (2*(hts^2)*ksy))];

K = [K1; K2; K3; K4; K5; K6; K7; K8; K9];

```

### %Matriz C

```

C1 = [(-4*csz) 0 0 (2*csz) 0 0 (2*csz) 0 0];
C2 = [0 -((4*csx*(hcs^2)) + (4*(l^2)*csz)) 0 -(2*l*csz) -(2*hcs*hts*csx) 0 -
(2*l*csz) -(2*hcs*hts*csx) 0];
C3 = [0 0 -((4*csy*(hcs^2)) + ((4*csz*(ds^2)))) 0 0 ((2*csz*(ds^2)) -
(2*csy*hts*hcs)) 0 0 ((2*csz*(ds^2)) - (2*csy*hts*hcs))];
C4 = [2*csz -2*csz*l 0 -(4*cpz + 2*csz) 0 0 0 0];
C5 = [0 -((2*csx*hcs*hts)) 0 0 -(2*csx*(hts^2) + 4*cpx*(htp^2) + 4*(b^2)*cpz) 0 0
0 0];

```

$C6 = [0 \ 0 \ (2*(ds^2)*csz - 2*csy*hcs*hts) \ 0 \ 0 \ -((4*htp^2*cpy) + (4*dp^2*cpz) + (2*ds^2*csz) + (2*(hts^2)*csy)) \ 0 \ 0 \ 0];$

$C7 = [2*csz \ -2*csz \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -(2*csz + 4*cpz) \ 0 \ 0];$

$C8 = [0 \ -(2*csx*hcs*hts) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -(2*csx*(hts^2) + 4*cpz*(htp^2) + 4*(b^2)*cpz) \ 0];$

$C9 = [0 \ 0 \ (2*(ds^2)*csz - 2*csy*hcs*hts) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -((4*htp^2*cpy) + (4*dp^2*cpz) + (2*ds^2*csz) + (2*(hts^2)*csy))];$

$C = [C1; C2; C3; C4; C5; C6; C7; C8; C9];$

#### %Matriz Fu

$Fu = [1 \ 1 \ 1 \ 1; \ -1 \ -1 \ 1 \ 1; \ ds \ -ds \ ds \ -ds; \ -1 \ -1 \ 0 \ 0; \ zeros(1,4); \ -ds \ +ds \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ -1 \ -1; \ zeros(1,4); \ 0 \ 0 \ -ds \ +ds];$

#### %Matriz Fw

$Fw = [zeros(3,16); \ dp*kpz/a \ dp*kpz/a \ dp*kpz/a \ dp*kpz/a \ zeros(1,4) \ dp*cpz/a \ dp*cpz/a \ dp*cpz/a \ dp*cpz/a \ zeros(1,4);$

$\quad -b*dp*kpz/a \ -b*dp*kpz/a \ b*dp*kpz/a \ b*dp*kpz/a \ zeros(1,4) \ -b*dp*cpz/a \ -b*dp*cpz/a \ b*dp*cpz/a \ b*dp*cpz/a \ zeros(1,4);$

$\quad (dp^2)*kpz/a \ -(dp^2)*kpz/a \ (dp^2)*kpz/a \ -(dp^2)*kpz/a \ zeros(1,4) \ (dp^2)*cpz/a \ -(dp^2)*cpz/a \ (dp^2)*cpz/a \ -(dp^2)*cpz/a \ zeros(1,4);$

$\quad zeros(1,4) \ dp*kpz/a \ dp*kpz/a \ dp*kpz/a \ dp*kpz/a \ zeros(1,4) \ dp*cpz/a \ dp*cpz/a \ dp*cpz/a \ dp*cpz/a;$

$\quad zeros(1,4) \ -b*dp*kpz/a \ -b*dp*kpz/a \ b*dp*kpz/a \ b*dp*kpz/a \ zeros(1,4) \ -b*dp*cpz/a \ -b*dp*cpz/a \ b*dp*cpz/a \ b*dp*cpz/a;$

$\quad zeros(1,4) \ (dp^2)*kpz/a \ -(dp^2)*kpz/a \ (dp^2)*kpz/a \ -(dp^2)*kpz/a \ zeros(1,4) \ (dp^2)*cpz/a \ -(dp^2)*cpz/a \ (dp^2)*cpz/a \ -(dp^2)*cpz/a];$

#### %Inversa de M

$Minv = inv(M);$



*%Matrices A, C0, B, G, D y H*

$A_c = [\text{zeros}(9) \text{ eye}(9); (\text{Minv} \cdot K) (\text{Minv} \cdot C)];$

$C_0 = [(\text{Minv} \cdot K) (\text{Minv} \cdot C)];$

$B_0 = [\text{zeros}(9,4); \text{Minv} \cdot F_u];$

$G = [\text{zeros}(9,16); \text{Minv} \cdot F_w];$

$B = [B_0 \ G];$

$D_0 = \text{Minv} \cdot F_u;$

$H = \text{Minv} \cdot F_w;$

$D = [D_0 \ H];$

$\text{SISTEMA\_A} = \text{ss}(A_c, B, C_0, D);$

$\text{SISTEMA\_D\_A} = \text{c2d}(\text{SISTEMA\_A}, 0.001);$

$A_d\_A = \text{SISTEMA\_D\_A}.a;$

$B_d\_A = \text{SISTEMA\_D\_A}.b;$

$C_d\_A = \text{SISTEMA\_D\_A}.c;$

$D_d\_A = \text{SISTEMA\_D\_A}.d;$

*%%%%%%%%%%%%%%INICIO DLQRY%%%%%%%%%%%%%%*

$n_x = 18;$

$n_y = 9;$

$n_u = 4;$

$n_w = 16;$

$Q_1 = 8e8;$

$Q_2 = 8e8;$

$Q_3 = 8e8;$

$Q_{13} = 100;$

$Q_{16} = 100;$

```
Q4 = zeros(9);
```

```
Qreg_d_A = blkdiag(Q1, Q2, Q3, Q4, Q13, 0, 0, Q16, 0, 0);
```

```
Rreg_d_A = 0.01*eye(nu);
```

```
Kreg_d = dlqr(Ad_A,Bd_A(:,1:4),Qreg_d_A,Rreg_d_A);
```

```
Q4 = zeros(3);
```

```
Q1 = 8e8;
```

```
Q2 = 8e8;
```

```
Q3 = 8e8;
```

```
Q7 = 100;
```

```
Q9 = 100;
```

```
Qregy_d_A = blkdiag(Q1, Q2, Q3, Q4, Q7, 0, Q9);
```

```
Rregy_d_A = 0.01*eye(nu);
```

```
Kreg_dy = dlqry(Ad_A,Bd_A(:,1:4),Cd_A,Dd_A(:,1:4),Qregy_d_A,Rregy_d_A);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%FIN DLQRY%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%INICIO MATRIZ DE COVARIANZAS
```

```
entradas_ruido = [z1R; z1L; z2R; z2L; z3R; z3L; z4R; z4L; v1R; v1L; v2R; v2L;  
v3R; v3L; v4R; v4L];
```

```
%Covarianza observaciones
```

```
Rkalman = eye(9);
```

```
%Covarianza estados
```

```
Qkalman = 20*eye(18);
```

**%%%INICIO MATRIZ DE COVARIANZAS**

```
usfr_c = 0.0;
```

```
usfl_c = 0.0;
```

```
usrr_c = 0.0;
```

```
usrl_c = 0.0;
```

```
ent_control = [usfr_c;usfl_c;usrr_c;usrl_c];
```

```
for i=0:Ts:5
```

**%State prediction**

```
ent_irregularidades = [z1R(count); z1L(count); z2R(count); z2L(count);  
z3R(count); z3L(count); z4R(count); z4L(count); v1R(count); v1L(count);  
v2R(count); v2L(count); v3R(count); v3L(count); v4R(count); v4L(count)];
```

```
IRREGULARIDADES(:,count) = ent_irregularidades;
```

**%%%INICIO SISTEMA REAL**

```
x_real = Ad_A*x_real + Bd_A(:,1:4)*ent_control +  
Bd_A(:,5:20)*ent_irregularidades;
```

```
y_real = Cd_A*x_real + Dd_A(:,1:4)*ent_control +  
Dd_A(:,5:20)*ent_irregularidades;
```

```
Yreal(:,count) = y_real;
```

```
Xreal(:,count) = x_real;
```

```
SISTEMA_REAL(:,count) = y_real;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%FIN SISTEMA REAL%%%%%%%%%%%%%%
```

%%INICIO KALMAN%%

$X = A_d A X + B_d A(:, 1:4) * \text{ent\_control};$

$X_{\text{est}}(:, \text{count}) = X;$

$P = A_d A P A_d A' + Q_{\text{kalman}};$

*%Corrección de estado*

$K = P * C_d A' * \text{inv}(C_d A P C_d A' + R_{\text{kalman}});$

$Y = C_d A X + D_d A(:, 1:4) * \text{ent\_control};$

$Y_{\text{est}}(:, \text{count}) = Y;$

$\text{error} = Y_{\text{real}}(:, \text{count}) - Y;$

$X = X + K * \text{error};$  *%%%estimación de estado*

$P = (I_s - K * C_d A) * P;$

%%FIN KALMAN%%

$\text{ent\_control} = -K_{\text{reg\_d}} * X;$

$\text{ent\_controlY} = -K_{\text{reg\_dy}} * X;$

$\text{CONTROL}(:, \text{count}) = \text{ent\_control};$

$\text{CONTROLY}(:, \text{count}) = \text{ent\_controlY};$

$\text{count} = \text{count} + 1;$

*end*

*%ACELERACIONES*

$AC = Y_{\text{real}}(1,:);$

$PHIC = Y_{\text{real}}(2,:);$

$THETAC = Y_{\text{real}}(3,:);$

$AT1 = Y_{\text{real}}(4,:);$

$PHIT1 = Y_{\text{real}}(5,:);$

$THETAT1 = Y_{\text{real}}(6,:);$

$AT2 = Y_{\text{real}}(7,:);$

```
PHIT2 = Yreal(8,:);
THETAT2 = Yreal(9,:);
```

### 5.3. Resultados

Para la representación de resultados se incluyen unas líneas de MATLAB con el siguiente formato:

```
figure(1) %Figura número 1
s(1) = subplot(3,1,1); %Dentro de la figura se representa el primer gráfico de 3
plot(AC,'m') %Se va a representar el parámetro AC
grid %Se representa la cuadrícula
title('Aceleración tren DLQRY') %Se nombra el título del gráfico
xlabel('Tiempo (ms)') %Se introduce el nombre del eje x
ylabel('Aceleracion m/s2') %Se introduce el nombre del eje y
axis([500,5000,-0.5,0.5]) %Se introducen los límites de los ejes a representar
```

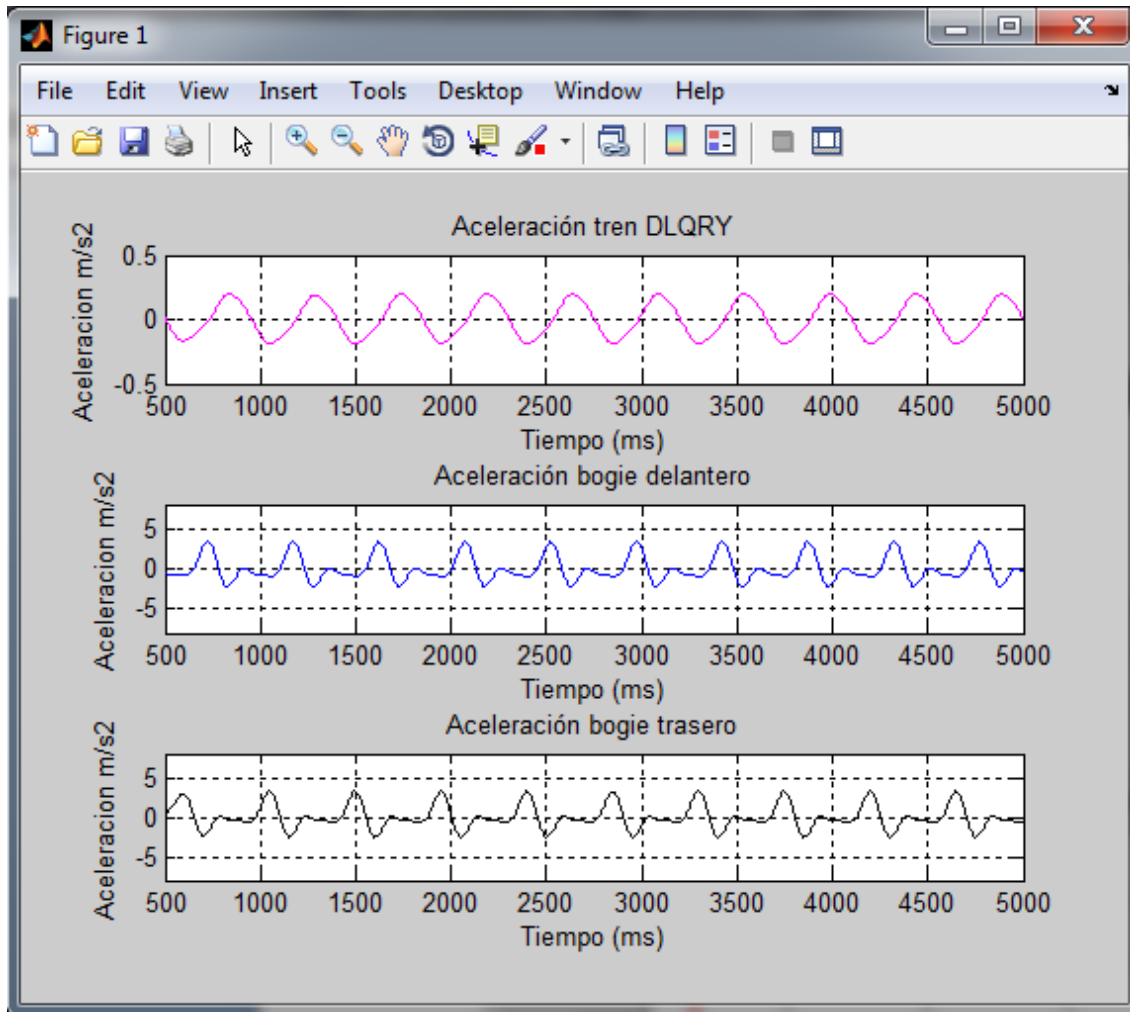
Como ejemplo se indican la representación de valores tales como alguna de las aceleraciones o fuerzas.

Representación de aceleraciones en el bogie:

```
figure(1)
s(1) = subplot(3,1,1);
plot(AC,'m')
grid
title('Aceleración tren DLQRY')
xlabel('Tiempo (ms)')
ylabel('Aceleracion m/s2')
axis([500,5000,-0.5,0.5])
```

```
s(2) = subplot(3,1,2);  
plot(AT1,'b')  
grid  
title('Aceleración bogie delantero')  
xlabel('Tiempo (ms)')  
ylabel('Aceleracion m/s2')  
axis([500,5000,-8,8])
```

```
s(3) = subplot(3,1,3);  
plot(AT2,'k')  
grid  
title('Aceleración bogie trasero')  
xlabel('Tiempo (ms)')  
ylabel('Aceleracion m/s2')  
axis([500,5000,-8,8])
```



Se pueden observar las variaciones que ocurren en las distintas aceleraciones principales. La primera de ellas representa la aceleración que sufre la masa suspendida (caja). Observando la gráfica se comprueba que la aceleración es constante y no sufre irregularidades, por lo que el controlador cumple con su función y regula de manera óptima la suspensión para que las perturbaciones visibles en las aceleraciones de los *bogies* no estén presentes. La diferencia que se observa en las aceleraciones de los bogies viene determinada por su posición delantera o trasera, siendo las amplitudes la misma pero con un cierto retraso.

#### Representación de Fuerzas en el bogie:

*figure(2)*

*plot(CONTROL(1,:), 'r');*

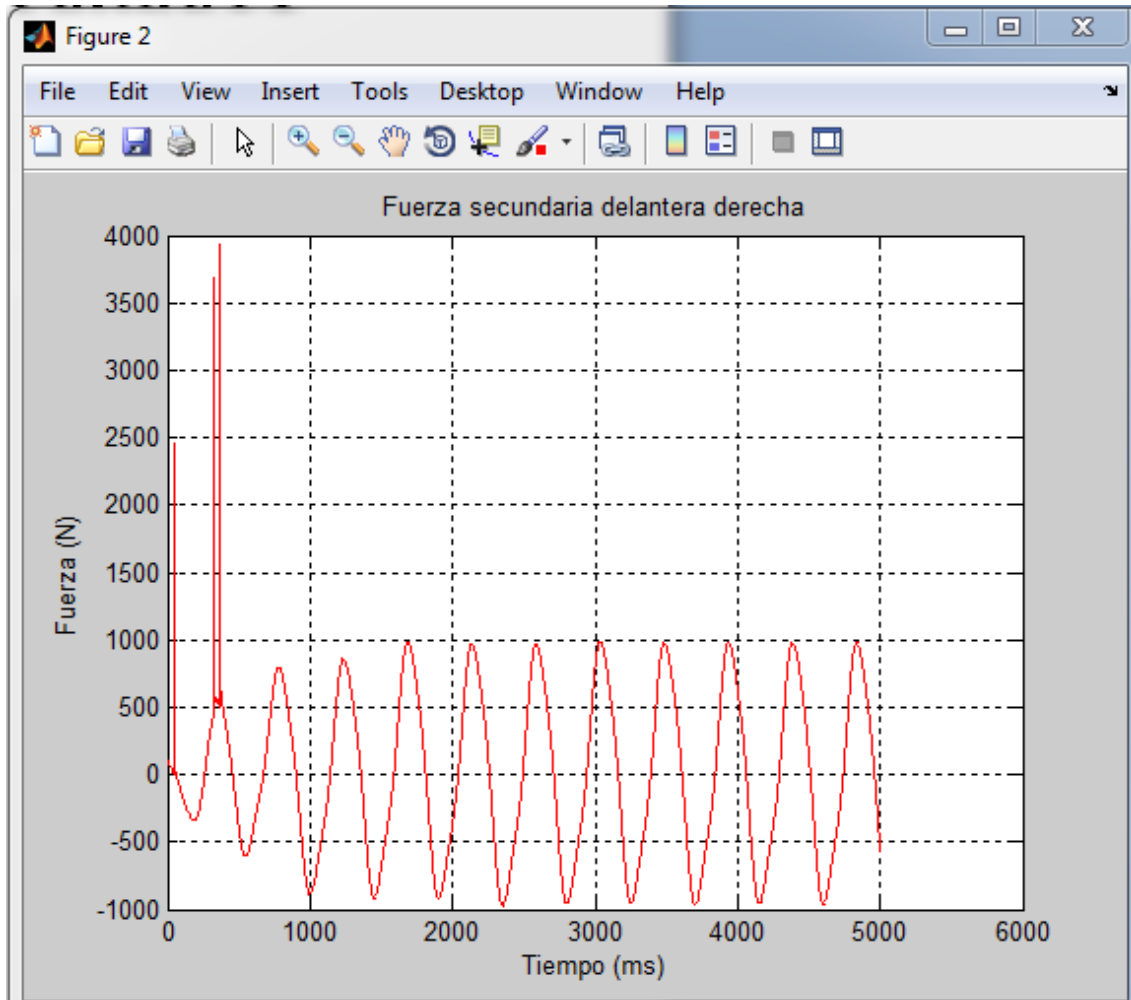
*title('Fuerza secundaria delantera derecha')*

*grid*

```

xlabel('Tiempo (ms)')
ylabel('Fuerza (N)')
% axis([500,5000,-1000,1000])

```



Se observa que al comienzo existen picos de irregularidad en la fuerza pero que con el tiempo el controlador regula la amplitud de la fuerza y la hace constante.

#### Representación de aceleraciones en la suspensión:

```

figure(3)
s(1) = subplot(2,2,1);
plot(salidas_P(:,1),'r');
grid

```



```

title('Aceleracion pasiva')
xlabel('Tiempo (ms)')
ylabel('Aceleracion m/s2')
axis([0,5000,-3,3])

```

```

s(2) = subplot(2,2,2);
plot(salidas_discreto_P(:,1),'b');
grid
title('Aceleracion pasiva discreta')
xlabel('Tiempo (ms)')
ylabel('Aceleracion m/s2')
axis([0,5000,-3,3])

```

```

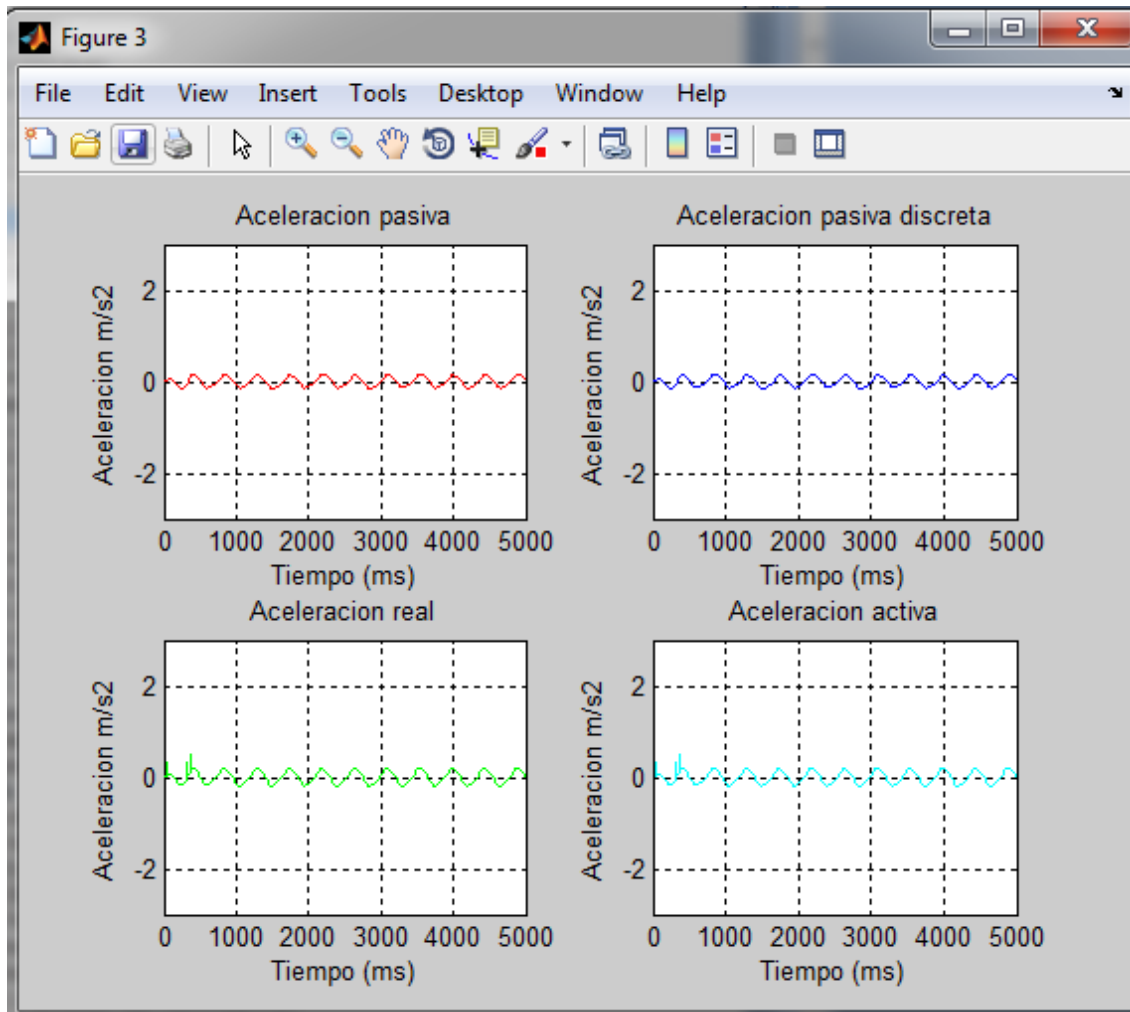
s(3) = subplot(2,2,3);
plot(SISTEMA_REAL(1,:), 'g');
grid
title('Aceleracion real')
xlabel('Tiempo (ms)')
ylabel('Aceleracion m/s2')
axis([0,5000,-3,3])

```

```

s(4) = subplot(2,2,4);
plot(Yest(1,:), 'c');
grid
title('Aceleracion activa')
xlabel('Tiempo (ms)')
ylabel('Aceleracion m/s2')
axis([0,5000,-3,3])

```



Se representan distintos tipos de aceleraciones para observar que todas se regulan y se mantienen constantes.

# **Capítulo 6. Modelado de un vehículo ferroviario para futuros trabajos**

Actualmente, la dinámica del vehículo se estudia mediante experimentos con prototipos virtuales, mientras que los prototipos reales se usan en la fase de desarrollo para obtener parámetros de simulación, validar resultados intermedios y optimizar. La simulación permite analizar la calidad de conducción, el rendimiento en carretera y el confort. Así como generar animaciones en tiempo real de la respuesta dinámica del sistema. Para el análisis del sistema de suspensión y su interacción con el vehículo se utilizan técnicas gráficas generales para modelado de sistemas dinámicos físicos, las cuales establecen relaciones de unión entre sus elementos.

Una de las ideas gráficas más representativas son los sistemas “multi-cuerpo”, los cuales relacionan sus elementos mediante pares cinemáticos. Con este fin se pueden utilizar entornos de programación específicos como SIMPACK, Adams o Visual Nastran. Estos modelos permiten la co-simulación con estrategias de control en otros entornos como Matlab/Simulink. Así, se puede simular el movimiento del vehículo para el diseño del control, o evaluar el confort de la suspensión en vehículos ferroviarios [34].

En esta sección se describe el proceso de implementación de un modelo simplificado de un vehículo ferroviario en el programa de simulación "multi-cuerpo" SIMPACK.

## 6.1. Software utilizado (SIMPACK)

SIMPACK es un programa que permite la simulación de varios cuerpos, generalmente usado para el análisis dinámico de una estructura mecánica o mecatrónica. El programa permite generar y resolver modelos virtuales en 3D observando el comportamiento de las distintas fuerzas y tensiones que actúan sobre ellos [35]. Además aporta una simulación del movimiento de dichos modelos a lo largo del tiempo.

El principal objetivo de SIMPACK es ayudar a los ingenieros a comprender plenamente y optimizar sistemas, reduciendo la necesidad de fabricar prototipos físicos y para mejorar la calidad y vida útil del producto. En resumen,

SIMPACK permite a los fabricantes obtener una gran ventaja competitiva al ofrecer la capacidad de crear productos de alta calidad en poco tiempo y de manera muy eficiente, reduciendo así los costes generales en el diseño, producción y mantenimiento.

Además de tomar en cuenta la dinámica y el control interno, el programa es capaz de considerar cualquier influencia externa que se aplique sobre el sistema como por ejemplo perturbaciones en el terreno o la carga aerodinámica.

SIMPACK trabaja en un rango de frecuencias muy completo; desde el análisis de la estática a la cuasi-estática hasta llegar a estudiar el análisis de frecuencias transitorias no lineales, incluso dentro de la gama acústica. SIMPACK se destaca especialmente en el análisis de alta frecuencia transitoria, capaz de estudiar el comportamiento de los cuerpos flexibles expuestos a vibraciones de alta frecuencia.

Este software es utilizado principalmente en los sectores de automoción, ferrocarril, motor, aerogeneradores, transmisión de energía e industria aeroespacial. Dentro de estas industrias SIMPACK se utiliza para el diseño de un solo componente y el análisis del sistema completo en el que intervienen diferentes componentes individuales previamente diseñados.

En el sector de la industria aeroespacial cabe destacar el uso de este software por parte de universidades e institutos como: Universität Stuttgart, DLR Institute of Robotics and Mechatronics y TU Wien Institute of Mechanics and Mechatronics. Siendo más largo el estudio dentro del campo de la automoción donde encontramos el uso del programa por parte de: BMW Group, Delta Motorsport, Epsilon Euskadi, Jaguar and Land Rover, etc. Otro campo con grandes estudio es el sector ferroviario donde empresas como KTH Stockholm, Voith Engineering Services Road & Rail o Siemens Transportation Systems Krefeld, etc, han utilizado este software para el desarrollo de nuevos prototipos e investigaciones.

Como resultado de aplicaciones en la industria ferroviaria, SIMPACK es capaz de manejar sistemas dinámicos, como por ejemplo el contacto entre las ruedas de un vehículo ferroviario y los raíles de la vía del tren. Siendo este concepto

de especial interés en el estudio desarrollado en este proyecto donde se busca analizar el comportamiento de la dinámica vertical de un vehículo ferroviario.

En cuanto al funcionamiento del programa, SIMPACK consta de cuatro grandes partes: Preprocesador, Postprocesador, Solucionador y *Wizard*.

### 6.1.1. Preprocesador

El preprocesador permite a los usuarios construir modelos a partir de cero. Usando la gran variedad de elementos incluidos dentro del software, se puede generar modelos básicos para la investigación de fenómenos dinámicos generales.

Se requiere del preprocesador para el uso de la mayoría de los otros módulos de SIMPACK.

Este módulo se compone de 4 ventanas. La ventana principal está ubicada en la esquina superior izquierda y muestra el modelo creado, bien sea en 3-D o en 2-D. En la parte superior derecha se representa el árbol con los elementos del modelo creado (estos elementos se detallan en el Anexo C). En la esquina inferior derecha se muestran las variables definidas y utilizadas para definir los parámetros del modelo, así como las subrutinas compuestas por modelos ya creados en otros ficheros. Por último, en la parte inferior izquierda se muestra el cómputo del modelo creado y sus posibles errores o problemas que puedan surgir al crear y definir elementos.

En la imagen 6.1. se muestra la pantalla del preprocesador de SIMPACK.

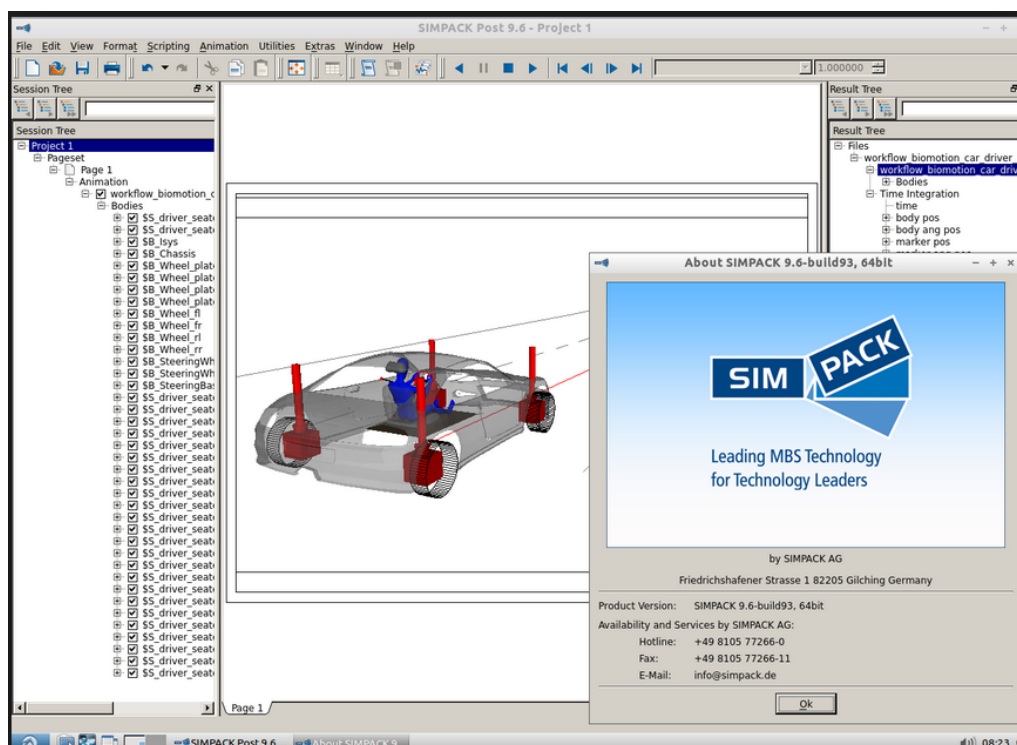


Figura 6.1. Pantalla del Preprocesador

### 6.1.2. Postprocesador

El postprocesador o “SIMPACK Post” es utilizado para la visualización de los resultados, ya sea mediante gráficos en dos o tres dimensiones o directamente con una simulación en el tiempo sobre el modelo generado.

Para el acomodamiento de la visualización de datos, existe una librería de filtros que facilita la observación del comportamiento del modelo.

Cabe destacar la posibilidad de exportar los resultados a hojas de cálculo como Excel para optar a otros tratamientos de datos.

En la imagen 6.2. se muestra la pantalla del postprocesador.

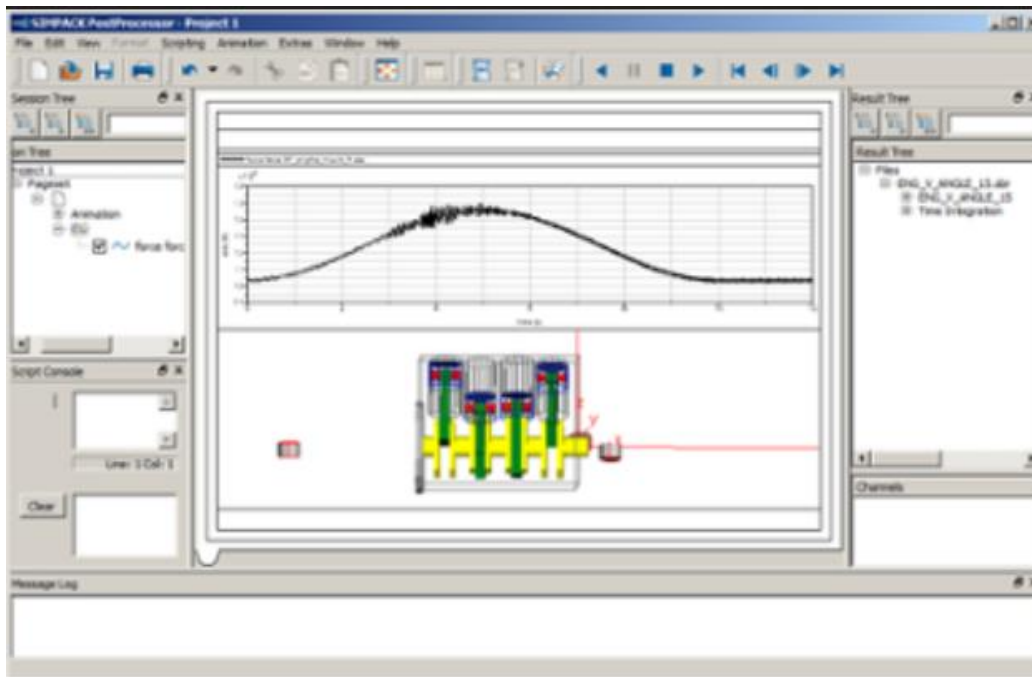


Figura 6.2. Postprocesador de Simpack

### 6.1.3. Solucionador

El solucionador de SIMPACK ofrece la posibilidad de analizar los modelos creados en función del tiempo o el dominio de la frecuencia.

Gracias a este sistema, se puede observar el comportamiento dinámico del modelo y definir sistemas de equilibrio. Otro dato importante es la capacidad de SIMPACK para calcular las fuerzas y tensiones que actúan sobre el sistema.

En la Figura 6.3. se puede observar varias opciones de análisis que ofrece el solucionador de SIMPACK.



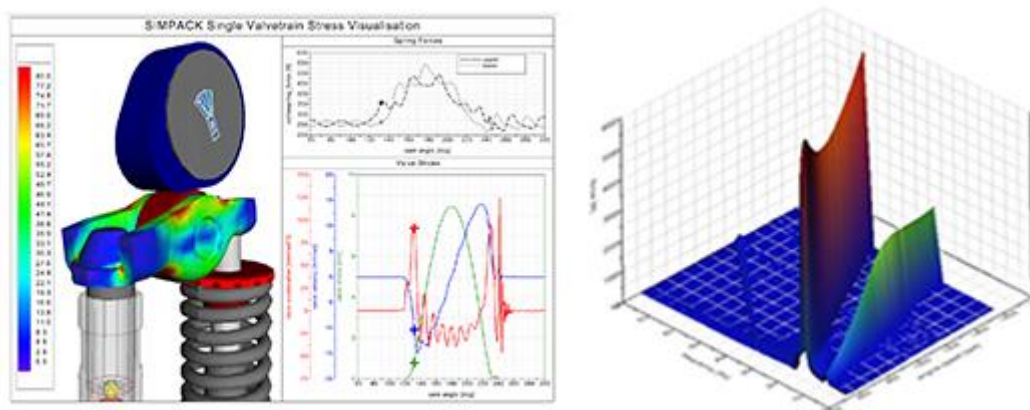


Figura 6.3. Opciones de análisis que ofrece el solucionador de Simpack

#### 6.1.4. Wizard

“Wizard” es un módulo alternativo de SIMPACK el cual permite una fácil configuración de modelos normalizados, incluyendo la generación de informes de resultados estándar, tal y como se muestra en la Figura 6.4. Los modelos y escenarios disponibles de análisis se basan en modelos estándar de la base de datos de SIMPACK. Estos modelos pueden ser adaptados y modificados utilizando el módulo de Preprocesador.

Este módulo permite la agilización de modelos estándar por parte de las empresas.

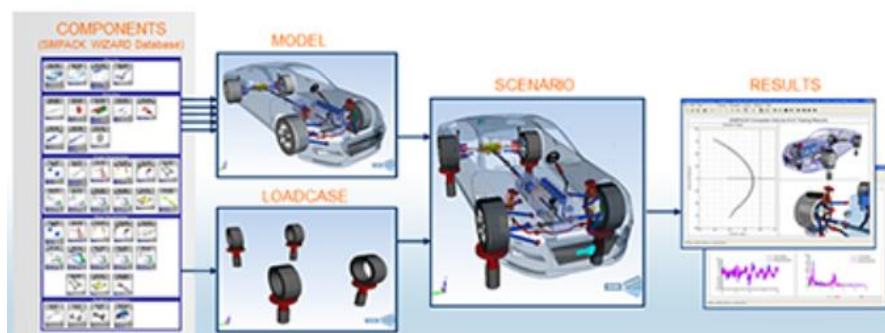


Figura 6.4. Ejemplo de configuración de un modelo de coche mediante el módulo Wizard

## 6.2. Modelado del tren

El vehículo ferroviario consiste en la modelización de un conjunto de subestructuras como son 1 vagón y 2 *bogies* (un bogie delantero y otro trasero). Los *bogies*, a su vez, están formados por otras dos subestructuras de “ruedas-eje” y 1 cabezal fijo.

Por otro lado, el tren será representado en unos raíles por los que se hará mover el vehículo para observar la simulación de éste a distintos aspectos a los que se someta.

A continuación se detalla la creación de un modelo de vehículo ferroviario. Para una visión más detallada y técnica referirse al Anexo D.

### 6.2.1. Pasos previos

En primer lugar, se crea una carpeta (por ejemplo, “modelo\_tren”) donde se va a guardar el modelo de vehículo completo. Dentro de esta carpeta, se crean otras carpetas donde se van a guardar las subestructuras, funciones de entrada, variables, etc. y, por último, el modelo principal (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

En la subcarpeta “base\_datos/funciones” guardar los ficheros: “Bumpstop.if2”, “PrimDamp\_Vert\_d.if2”, “SecDamp\_Lat\_d.if2” y “SecDamp\_Vert\_d.if2”.

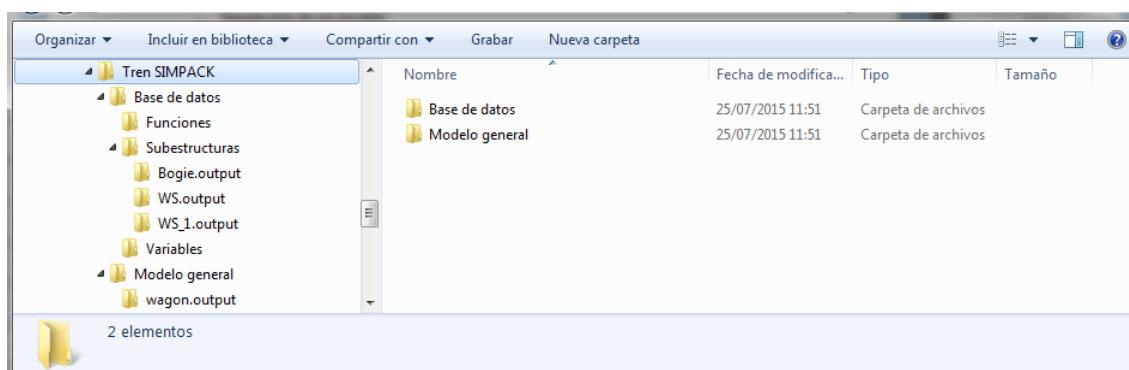


Figura 6.5. Pasos previos. Creación de carpetas.

### 6.2.2. Modelado de las ruedas-eje

A continuación se describen los pasos necesarios para crear una subestructura de eje y ruedas el cual irá montado sobre los raíles de las vías. El proceso consta de dos partes:

- Creación del modelo ruedas-eje.
- Definición del estado inicial de equilibrio.

#### 6.2.2.1. Creación del modelo ruedas-eje

Se comienza creando un nuevo modelo de SIMPACK usando la plantilla “General”. Para una mayor comodidad se cambia el sentido de la gravedad, ajustando el signo de “menos” a “más” en la dirección del eje “z” y se rota el modelo de forma que el eje “x” apunte hacia adentro, el eje “y” hacia la derecha y el eje “z” hacia abajo.

Se cambia el tipo de objeto creado a “cilindro”, obteniendo así nuestro eje.

Por otro lado, se modela la vía por donde circularán las ruedas de nuestro modelo. Para ello se crea un elemento llamado “Track” que define el trazado y sobre el cual se implementa otro elemento llamado “Rail”, que representa los raíles de la vía.

El modelo creado se muestra en la Figura 6.6.

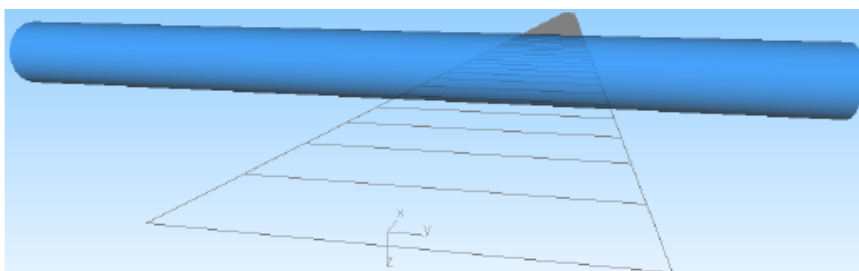


Figura 6.6. Modelado de un eje

Se incorporan dos ruedas en los extremos del cilindro utilizando el elemento “Rail-Wheel Pair”. Es importante definir el correcto tipo de rueda (en nuestro caso con un radio de 460mm) y el contacto rueda-raíl (al cual definimos un coeficiente de fricción de 0,4).

Para agrupar las ruedas creadas con el eje se debe crear un elemento llamado “Wheelset”, al cual se debe definir, también, el contacto con los raíles.

La estructura creada queda tal y como se observa en la Figura 6.7.

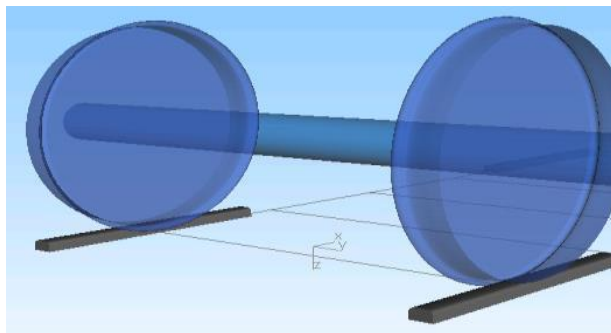


Figura 6.7. Modelado del conjunto ruedas-eje

#### 6.2.2.2. Definición del estado inicial de equilibrio

Es importante definir un estado de equilibrio ya que el modelo puede no simularse bien e incluso llegar a observar que las ruedas se separan de los raíles cuando comienzan a moverse. Se puede definir de dos formas diferentes: utilizando el “Preload Solver” o definiendo directamente el sistema de equilibrio mediante el botón habilitado para ello.

Para vehículos ferroviarios es más común usar el primer sistema el cual consta de un cálculo, automático por parte del programa, de las fuerzas que interaccionan con la gravedad. Previamente a este cálculo se debe definir el sistema en un estado de reposo, poniendo la velocidad global del sistema a 0.

#### 6.2.3. Modelado del *bogie*

El siguiente objeto que se crea es denominado “Bogie”. En él se enlazan dos modelos “rueda-eje” con una estructura estática que las mantiene unidas.

Para ello, se importan dos subestructuras de “rueda-eje”. A continuación, se separan una cierta distancia hacia adelante y hacia atrás y se nombran a las subestructuras de tal forma que se diferencien cuál es el eje delantero y cuál es el eje trasero, quedando la estructura tal y como se muestra en la Figura 6.8.

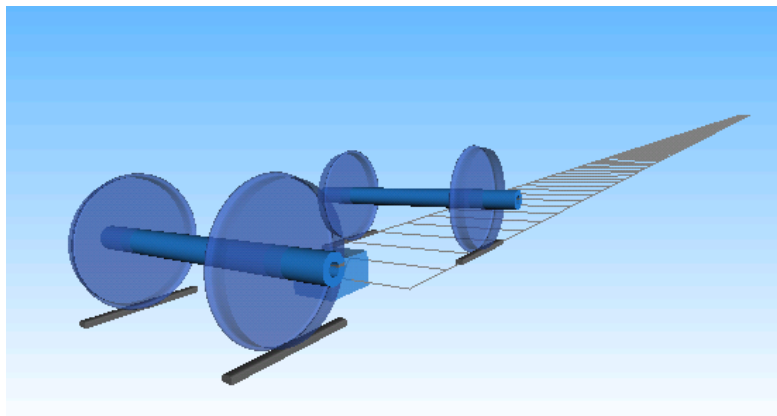


Figura 6.8. Subestructuras de dos conjuntos ruedas-eje

Se crea un objeto de tipo “Wheel Rail Bogie” con los valores que se detallan en el epígrafe D.1. del Anexo D. Esta estructura queda suspendida encima de las otras dos subestructuras “rueda-eje”, estando situada entre la suspensión primaria y secundaria que serán definidas más adelante.

El *bogie* queda definido tal y como se observa en la Figura 6.9.

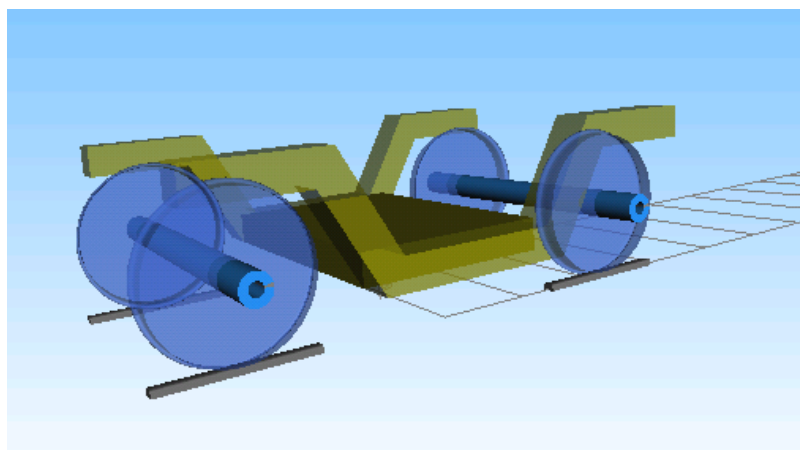


Figura 6.9. Modelado del Bogie

#### 6.2.4. Modelado del cabezal fijo

Para unir más fácilmente el “bogie” al vehículo ferroviario, se crea un cuerpo virtual (cuerpo tipo “dummy”) de masa infinitesimal denominado “cabezal fijo”. El cabezal es definido con 0 grados de libertad puesto que irá fijo al vagón. En la Figura 6.10. se observa cómo queda la estructura del *bogie* junto al cabezal fijo.

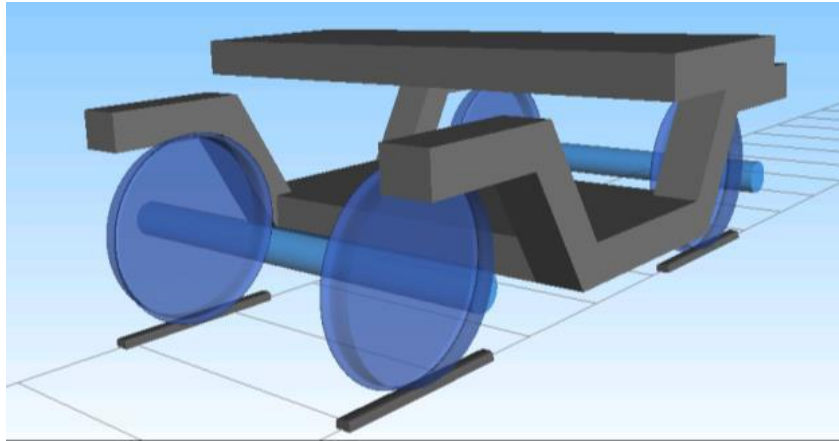


Figura 6.10. Modelado del Bogie con cabezal fijo

Este elemento conecta el vagón o vehículo ferroviario con el *bogie* a través de la suspensión secundaria. Para ello se definen los marcadores (*Markers*) necesarios para conectar la suspensión secundaria. En total son 6 marcadores, 2 para conectar los muelles verticales y 4 para conectar los amortiguadores verticales y laterales. Los marcadores se encuentran definidos en la tabla 4 del ANEXO D.

### 6.2.5. Modelado de la suspensión

El siguiente paso es la creación de la suspensión del tren. Se definen dos modelos diferentes de suspensión dependiendo de qué tipo de estructuras conecte:

- Suspensión primaria.
- Suspensión secundaria.

#### 6.2.5.1. Suspensión primaria

La suspensión primaria actúa de unión entre el “Bogie” y las subestructuras “ruedas-eje”. Ésta se encuentra definida por 4 muelles verticales (elemento *Force Element* de tipo 86) y 4 amortiguadores verticales (elemento *Force Element* de tipo 6), uno por cada rueda.

Para conectar la suspensión primaria, se crean los marcadores (*Markers*) necesarios definidos en el Anexo D, obteniendo la estructura que se muestra en la Figura 6.11.

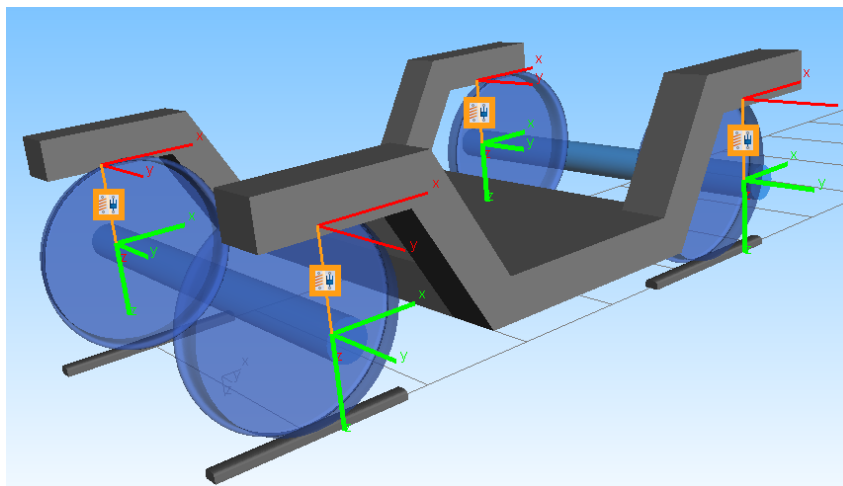


Figura 6.11. Modelado de la suspensión primaria

#### 6.2.5.2. Suspensión secundaria

La suspensión secundaria actúa de unión entre el vagón (a través del cabezal fijo) y el “Bogie”. Para dicha suspensión se crean 2 muelles verticales (elemento *Force Element* de tipo 79), 4 amortiguadores, 2 verticales y 2 laterales (elemento *Force Element* de tipo 6), 1 barra antitorsión (elemento *Force Element* de tipo 13) y un tope de impacto (elemento *Force Element* de tipo 5) denominado *Bumpstop*, el cual tiene como función absorber la energía que no puede absorber el amortiguador en su totalidad.

La estructura con los elementos de suspensión secundaria se muestra en la Figura 6.12.

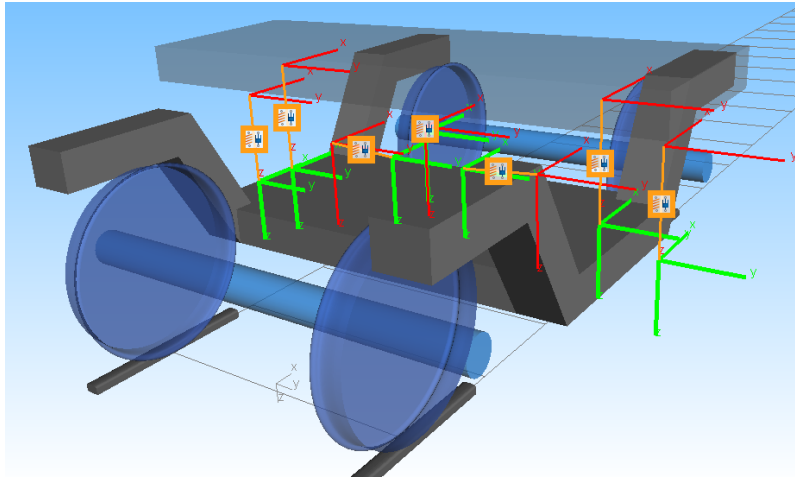


Figura 6.12. Modelado de la suspensión secundaria

### 6.2.6. Modelado del vagón

Para la estructura del vagón, se diseña un nuevo modelo, donde se trabaja el objeto que viene por defecto en forma de cubo. A este objeto se le cambia el tipo de “Cuboid” a “Wheel Rail Cab” y se le introducen los valores representados en el Anexo D.

Por otro lado, se crean dos subestructuras importando en cada una de ellas el modelo del “Bogie” con el cabezal fijo. Para unir estas subestructuras con el vagón, se crean 2 marcadores (*Markers*) y se unen éstos con los elementos *Joints* de cada cabezal fijo. El modelo del vehículo ferroviario queda ensamblado de la siguiente manera (Figura 6.13.):

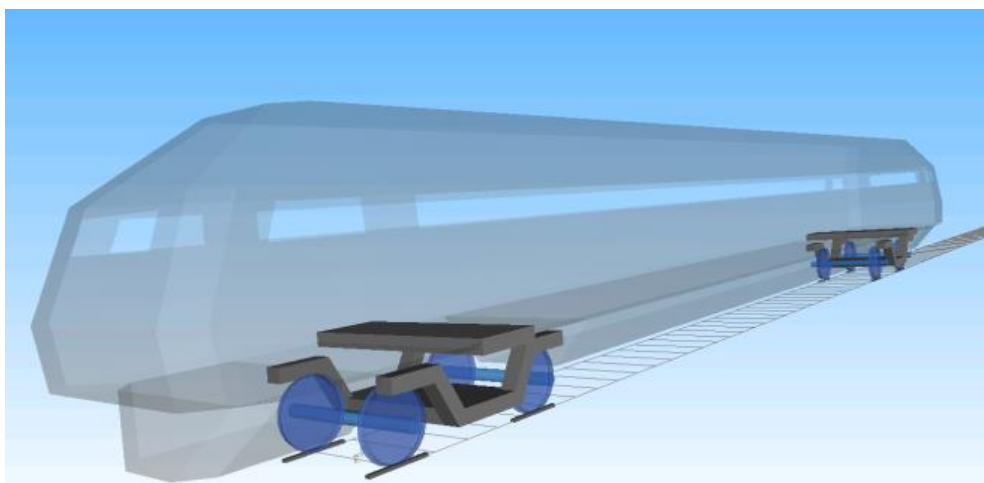


Figura 6.13. Modelado del vehículo ferroviario



# **Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros**

En este capítulo se hace un resumen del Proyecto, obteniendo las principales conclusiones. Además, se proponen una serie de Trabajos Futuros para darle más desarrollo a este Proyecto.

## 7.1. Conclusiones

- Se ha realizado un estudio sobre la suspensión en vehículos ferroviarios, donde se concluye que según su configuración, la suspensión pasiva tiene parámetros predeterminados y no es regulable automáticamente, la suspensión activa utiliza un actuador que incorpora energía para modificar la respuesta al sistema ante distintas perturbaciones del terreno y la suspensión semi-activa regula la rigidez y/o el coeficiente de amortiguamiento sin ingresar energía al sistema.
- Se investigan los tipos de controladores que se utilizan para el control de la suspensión activa y semi-activa en la suspensión de vehículos ferroviarios
- Se ha detallado el diseño de un controlador LQG, hallando su modelo lineal a partir de su diagrama de estados.
- Se ha realizado el modelo analítico de las ecuaciones que gobiernan tanto un sistema de suspensión activa como un sistema de suspensión semi-activa de un vehículo ferroviario.
- Se ha configurado un controlador LQG en el entorno de MATLAB a partir del modelo analítico de un sistema de suspensión semi-activa

## 7.2. Trabajos futuros

Se propone, como trabajos futuros para la realización de Proyectos en esta línea de investigación:

- Un estudio de simulación del controlador diseñado y un modelo de un vehículo ferroviario propuesto en el Capítulo 6 utilizando el programa de simulación SIMPACK.

- Diseñar un sistema de control basado en redes neuronales [36]. Con el controlador LQG configurado en este proyecto fin de carrera, se puede obtener un controlador basado en redes neuronales utilizando la función de MATLAB: “nnstart” [37].
- Comparación entre controladores.



# Presupuesto

El proyecto presenta un coste detallado a continuación:

Necesidades	Coste (€)
Horas de trabajo (360h) *	1800
Ordenador**	269,7
Pantalla***	45
Software****	36
<b>Total</b>	<b>2150,7</b>

\*El tiempo de trabajo ha sido aproximadamente de 5 horas a la semana durante 18 meses, haciendo un total de 360 horas. La hora de un becario se estima que cuesta unos 5€, por lo que el precio de las horas de trabajo asciende a 1800€.

\*\*El ordenador usado tiene un coste de 899€ con una vida de funcionamiento de 5 años, la utilización ha sido de 18 meses por lo que el coste es de 269,7€.

\*\*\*La pantalla tiene un precio de 120€ con una vida de funcionamiento de 4 años, su utilización ha sido de 18 meses, luego el coste total es de 45€.

\*\*\*\*La licencia del software de utilización, Windows 7 Home más Microsoft Office 2007, es de 120€ (80€ el sistema operativo y 40€ el office), válido por 5 años. El coste de utilización de 18 meses es de 36€.

Si implementamos un IVA por servicios del 21%, **el presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de 2602,35€.**

Leganés a de de 2017

Fdo. Juan Bautista de la Peña Abad



# Bibliografía y Referencias

- [1]. Dirección General de Energía y Transportes, Comisión Europea. Un ferrocarril moderno para una Europa moderna, 2008.
- [2]. Amer, N. H., R. Ramli, W. N. Mahadi y M. A. Abidin: A review on control strategies for passenger car intelligent suspension system. International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering, 404–409, 2011.
- [3]. <http://www.ferropedia.es/wiki/Bogie>
- [4]. Álvarez Mátaras, Daniel; Luque Rodríguez, Pablo; Universidad de Oviedo; Ferrocarriles: Ingeniería e infraestructura de los transportes, 2003.
- [5]. [http://www.renfe.com/viajeros/nuestros\\_trenes/cercanias446.html](http://www.renfe.com/viajeros/nuestros_trenes/cercanias446.html)
- [6]. [http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/16899/TFG\\_Andres\\_Gomez\\_Moron.pdf?sequence=1](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/16899/TFG_Andres_Gomez_Moron.pdf?sequence=1)
- [7]. [http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10779/pfc%20Juan%20Jurado%20Zurro%20\(28-07-2010\).pdf?sequence=1](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10779/pfc%20Juan%20Jurado%20Zurro%20(28-07-2010).pdf?sequence=1)
- [8]. [http://www.imac.unavarra.es/web\\_imac/pages/docencia/asignaturas/maquinas-iti/Trabajos/Amortiguadores.pdf](http://www.imac.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/asignaturas/maquinas-iti/Trabajos/Amortiguadores.pdf)
- [9]. [http://oa.upm.es/9836/1/PFC\\_08402373\\_Elia\\_Ruiz\\_Sandoval.pdf](http://oa.upm.es/9836/1/PFC_08402373_Elia_Ruiz_Sandoval.pdf)
- [10]. <http://www.aficionadosalamecanica.net/suspension2.htm>
- [11]. <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/tutorial65.pdf>
- [12]. <http://www.aficionadosalamecanica.net/suspension8.htm>
- [13]. Alexandru, C. y P. Alexandru: A comparative analysis between the vehicles passive and active suspensions. International Journal of Mechanics, 371–378, 2011.
- [14]. Hurel, J., A. Mandow y A. García-Cerezo: Los sistemas de suspensión activa y semiactiva: una revisión. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, 121–132, 2013.

- [15]. Cao, J., H. Liu, P. Li y D. J. Brown: State of the art in vehicle active suspension adaptive control systems based on intelligent methodologies. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 392–405, 2008.
- [16]. Karnopp, D.: Theoretical limitations in active vehicle suspensions. *Vehicle System Dynamics*, 41–54, 1986.
- [17]. Roth, P. A. y M. Lizell: A lateral semi-active damping system for trains. *Vehicle System Dynamics*, 585–598, 1996.
- [18]. Shiao, Y., C. C. Lai y Q. A. Nguyen: The analysis of a semi-active suspension system. *Proceedings of the SICE Annual Conference*, 2077–2082, 2010.
- [19]. [http://www.konradlorenz.edu.co/images/stories/suma\\_digital\\_maticas/Trabajo\\_Grado\\_Guillermo\\_Prado\\_613003.pdf](http://www.konradlorenz.edu.co/images/stories/suma_digital_maticas/Trabajo_Grado_Guillermo_Prado_613003.pdf)
- [20]. Ekoru, J. E., O. A. Dahunsi y J. O. Pedro: PID control of a nonlinear half-car active suspension system via force feedback. *IEEE AFRICON Conference*, 1–6, 2011.
- [21]. Kumar, M. S.: Development of active suspension system for automobiles using PID controller. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, volumen II, 2008.
- [22]. Sun, J. y Y. Sun: Comparative study on control strategy of active suspension system. *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, volumen 1, 729–732, 2011.
- [23]. Chen, J., W. Guo, W. Feng, H. Chen y F. Dong: Research of semi-active suspension self-adjust sky/ground-hook hybrid control simulation. *International Conference on Electric Information and Control Engineering*, 5230–5234, 2011.
- [24]. Hrovat, D.: Survey of advanced suspension developments and related optimal control applications. *Automatica*, 1781–1817, 1997.
- [25]. Nagai, M., A. Moran, Y. Tamura y S. Koizumi: Identification and control of nonlinear active pneumatic suspension for railway vehicles using neural networks. *Control Engineering Practice*, 1137–1144, 1997.



- [26]. Abu-Khudhair, A., R. Muresan y S. Yang: Fuzzy control of semi-active automotive suspensions. International Conference on Mechatronics and Automation, 2118–2122, 2009.
- [27]. Oliva Domínguez, Rubén Proyecto fin de máster. Desarrollo de un controlador borroso para la mejora del comportamiento vertical de un vehículo ferroviario. XX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Málaga. 2014.
- [28]. Sun, J. y K. Wang: Control method research of suspension system of engineering vehicle. International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 654–658, 2010.
- [29]. Nan, Y. H., D. J. Xuan, J. W. Kim, Q. Ning y Y. B. Kim: Control of an active suspension based on fuzzy logic. International Conference on Computer and Electrical Engineering, 303–307, 2008.
- [30]. Basari, A. A., Y. M. Sam y N. Hamzah: Nonlinear active suspension system with backstepping control strategy. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 554–558, 2007.
- [31]. [http://apps.elsevier.es/watermark/ctl\\_servlet?\\_f=10&pidet\\_articulo=90195906&pidet\\_usuario=0&pcontactid=&pidet\\_revista=331&ty=75&accion=L&origen=zonadelectura&web=www.elsevier.es&lan=es&fichero=331v10n02a90195906pdf001.pdf](http://apps.elsevier.es/watermark/ctl_servlet?_f=10&pidet_articulo=90195906&pidet_usuario=0&pcontactid=&pidet_revista=331&ty=75&accion=L&origen=zonadelectura&web=www.elsevier.es&lan=es&fichero=331v10n02a90195906pdf001.pdf)
- [32]. Liao W. H., Wang D. H.: Semiactive Vibration Control of Train Suspension Systems via Magnetorheological Dampers. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 14, 16. 2003. <http://jim.sagepub.com/cgi/content/abstract/14/3/161>.
- [33]. Savaresi, S. M., C. Poussot-Vassal, C. Spelta, L. Dugard y O. Sename: Semi-active suspension control design for vehicles. Elsevier Ltd., first edición, 2010.
- [34]. Samin, J. C., O. Bröls, J. F. Collard, L. Sass y P. Fisette: Multiphysics modeling and optimization of mechatronic multibody systems. Multibody System Dynamics, 18(3):345–373, 2007.
- [35]. Simpack Documentation. (2014) Simpack Release 9.7 Manual general.

- [36]. <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/DM/tema3dm.pdf>
- [37]. [http://www.iac.es/sieinvens/SINFIN/Sie\\_Courses\\_PDFs/NNets/confiac.pdf](http://www.iac.es/sieinvens/SINFIN/Sie_Courses_PDFs/NNets/confiac.pdf)

# **Anexo A. Nomenclatura de un sistema de suspensión semi- activa**

A continuación se detalla la nomenclatura empleada para el diseño del modelo analítico de un sistema de suspensión semi-activa.

Vehículo ferroviario:

- $m_c$ : masa de la carrocería vehículo ferroviario.
- $I_{cx}$ : momento de inercia de la carrocería en la dirección del eje x.
- $I_{cy}$ : momento de inercia de la carrocería en la dirección del eje y.
- $I_{cz}$ : momento de inercia de la carrocería en la dirección del eje z.
- $m_t$ : masa del bogie.
- $I_{tx}$ : momento de inercia del bogie en la dirección del eje x.
- $I_{ty}$ : momento de inercia del bogie en la dirección del eje y.
- $I_{tz}$ : momento de inercia del bogie en la dirección del eje z.
- $k_{px}$ : rigidez primaria en la dirección del eje x.
- $k_{py}$ : rigidez primaria en la dirección del eje y.
- $k_{pz}$ : rigidez primaria en la dirección del eje z.
- $C_{px}$ : coeficiente de amortiguación primaria en la dirección del eje x.
- $C_{py}$ : coeficiente de amortiguación primaria en la dirección del eje y.
- $C_{pz}$ : coeficiente de amortiguación primaria en la dirección del eje z.
- $k_{sx}$ : rigidez secundaria en la dirección del eje x.
- $k_{sy}$ : rigidez secundaria en la dirección del eje y.
- $k_{sz}$ : rigidez secundaria en la dirección del eje z.
- $c_{sx}$ : coeficiente de amortiguación secundaria en la dirección del eje x.
- $c_{sy}$ : coeficiente de amortiguación secundaria en la dirección del eje y.
- $c_{sz}$ : coeficiente de amortiguación secundaria en la dirección del eje z.
- $l$ : distancia desde el centro de gravedad de la carrocería al centro de gravedad de un bogie en la dirección x.
- $b$ : mitad de la distancia entre los ejes delantero y trasero.
- $d_p$ : distancia desde el centro de gravedad de la carrocería a un amortiguador primario en la dirección y.
- $u_n$ : mitad de la distancia de contacto de los rodamientos.
- $d_s$ : distancia desde el centro de gravedad de la carrocería a un amortiguador secundario en la dirección y.

- $a$ : distancia desde el centro de gravedad de la carrocería a una rueda en la dirección  $y$ .
- $h_{cs}$ : distancia vertical del centro de gravedad de la carrocería a la suspensión secundaria.
- $h_{tp}$ : distancia vertical del centro de gravedad del bogie a la suspensión primaria.
- $h_{wp}$ : distancia vertical del centro de gravedad del eje a la suspensión primaria.
- $V$ : velocidad del vehículo ferroviario.

Irregularidades:

- $z_{1r}$ : perturbación vertical que actúa en la rueda delantera derecha del bogie delantero
- $z_{1l}$ : perturbación vertical que actúa en la rueda delantera izquierda del bogie delantero
- $z_{2r}$ : perturbación vertical que actúa en la rueda trasera derecha del bogie delantero
- $z_{2l}$ : perturbación vertical que actúa en la rueda trasera izquierda del bogie delantero
- $z_{3r}$ : perturbación vertical que actúa en la rueda delantera derecha del bogie trasero
- $z_{3l}$ : perturbación vertical que actúa en la rueda delantera izquierda del bogie trasero
- $z_{4r}$ : perturbación vertical que actúa en la rueda trasera derecha del bogie trasero
- $z_{4l}$ : perturbación vertical que actúa en la rueda trasera izquierda del bogie trasero



# **Anexo B. Ecuaciones de las Fuerzas que actúan en un sistema de suspensión semi- activa**

A continuación se enumeran las definiciones de las fuerzas que actúan en un sistema de suspensión semi-activa:

- En las ecuaciones (9) - (17):

$$\begin{cases} F_{sxlr} = -k_{sx}(h_{cs}\varphi_c + h_{ts}\varphi_{t1}) - c_{sx}(h_{cs}\dot{\varphi}_c + h_{ts}\dot{\varphi}_{t1}) \\ F_{sxll} = -k_{sx}(h_{cs}\varphi_c + h_{ts}\varphi_{t1}) - c_{sx}(h_{cs}\dot{\varphi}_c + h_{ts}\dot{\varphi}_{t1}) \\ F_{sxtr} = -k_{sx}(h_{cs}\varphi_c + h_{ts}\varphi_{t2}) - c_{sx}(h_{cs}\dot{\varphi}_c + h_{ts}\dot{\varphi}_{t2}) \\ F_{sxtl} = -k_{sx}(h_{cs}\varphi_c + h_{ts}\varphi_{t2}) - c_{sx}(h_{cs}\dot{\varphi}_c + h_{ts}\dot{\varphi}_{t2}) \end{cases}$$

Ecuación (21)

$$\begin{cases} F_{sylr} = k_{sy}(h_{cs}\theta_c + h_{ts}\theta_{t1}) + c_{sy}(h_{cs}\dot{\theta}_c + h_{ts}\dot{\theta}_{t1}) \\ F_{syll} = k_{sy}(h_{cs}\theta_c + h_{ts}\theta_{t1}) + c_{sy}(h_{cs}\dot{\theta}_c + h_{ts}\dot{\theta}_{t1}) \\ F_{sytr} = k_{sy}(h_{cs}\theta_c + h_{ts}\theta_{t2}) + c_{sy}(h_{cs}\dot{\theta}_c + h_{ts}\dot{\theta}_{t2}) \\ F_{sytl} = k_{sy}(h_{cs}\theta_c + h_{ts}\theta_{t2}) + c_{sy}(h_{cs}\dot{\theta}_c + h_{ts}\dot{\theta}_{t2}) \end{cases}$$

Ecuación (22)

$$\begin{cases} F_{szlr} = -k_{sz}[z_c - l\varphi_c - z_{t1} + d_s(\theta_c - \theta_{t1})] - c_{sz}[\dot{z}_c - l\dot{\varphi}_c - \dot{z}_{t1} + d_s(\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_{t1})] \\ F_{szll} = -k_{sz}[z_c - l\varphi_c - z_{t1} - d_s(\theta_c - \theta_{t1})] - c_{sz}[\dot{z}_c - l\dot{\varphi}_c - \dot{z}_{t1} - d_s(\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_{t1})] \\ F_{sztr} = -k_{sz}[z_c + l\varphi_c - z_{t1} + d_s(\theta_c - \theta_{t1})] - c_{sz}[\dot{z}_c + l\dot{\varphi}_c - \dot{z}_{t1} + d_s(\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_{t1})] \\ F_{sztl} = -k_{sz}[z_c + l\varphi_c - z_{t1} + d_s(\theta_c - \theta_{t1})] - c_{sz}[\dot{z}_c + l\dot{\varphi}_c - \dot{z}_{t1} - d_s(\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_{t1})] \end{cases}$$

Ecuación (23)

$$\begin{cases} F_{px1r} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t1} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t1} \\ F_{px1l} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t1} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t1} \\ F_{px2r} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t1} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t1} \\ F_{px2l} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t1} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t1} \\ F_{px3r} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t2} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t2} \\ F_{px3l} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t2} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t2} \\ F_{px4r} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t2} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t2} \\ F_{px4l} = -k_{px}h_{tp}\varphi_{t2} - c_{px}h_{tp}\dot{\varphi}_{t2} \end{cases}$$

Ecuación (24)



$$\begin{cases} F_{py1r} = k_{py}h_{tp}\theta_{t1} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t1} \\ F_{py1l} = k_{py}h_{tp}\theta_{t1} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t1} \\ F_{py2r} = k_{py}h_{tp}\theta_{t1} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t1} \\ F_{py2l} = k_{py}h_{tp}\theta_{t1} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t1} \\ F_{py3r} = k_{py}h_{tp}\theta_{t2} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t2} \\ F_{py3l} = k_{py}h_{tp}\theta_{t2} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t2} \\ F_{py4r} = k_{py}h_{tp}\theta_{t2} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t2} \\ F_{py4l} = k_{py}h_{tp}\theta_{t2} + c_{py}h_{tp}\dot{\theta}_{t2} \end{cases}$$

Ecuación (25)

$$\begin{cases} F_{pz1r} = -k_{pz}\left(z_{t1} - b\varphi_{t1} + d_p\theta_{t1} - \frac{d_p}{a}z_{1r}\right) - c_{pz}\left(\dot{z}_{t1} - b\dot{\varphi}_{t1} + d_p\dot{\theta}_{t1} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{1r}\right) \\ F_{pz1l} = -k_{pz}\left(z_{t1} - b\varphi_{t1} - d_p\theta_{t1} - \frac{d_p}{a}z_{1l}\right) - c_{pz}\left(\dot{z}_{t1} - b\dot{\varphi}_{t1} - d_p\dot{\theta}_{t1} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{1l}\right) \\ F_{pz2r} = -k_{pz}\left(z_{t1} + b\varphi_{t1} + d_p\theta_{t1} - \frac{d_p}{a}z_{2r}\right) - c_{pz}\left(\dot{z}_{t1} + b\dot{\varphi}_{t1} + d_p\dot{\theta}_{t1} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{2r}\right) \\ F_{pz2l} = -k_{pz}\left(z_{t1} + b\varphi_{t1} - d_p\theta_{t1} - \frac{d_p}{a}z_{2l}\right) - c_{pz}\left(\dot{z}_{t1} + b\dot{\varphi}_{t1} - d_p\dot{\theta}_{t1} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{2l}\right) \\ F_{pz3r} = -k_{pz}\left(z_{t2} - b\varphi_{t2} + d_p\theta_{t2} - \frac{d_p}{a}z_{3r}\right) - c_{pz}\left(\dot{z}_{t2} - b\dot{\varphi}_{t2} + d_p\dot{\theta}_{t2} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{3r}\right) \\ F_{pz3l} = -k_{pz}\left(z_{t2} - b\varphi_{t2} - d_p\theta_{t2} - \frac{d_p}{a}z_{3l}\right) - c_{pz}\left(\dot{z}_{t2} - b\dot{\varphi}_{t2} - d_p\dot{\theta}_{t2} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{3l}\right) \\ F_{pz4r} = -k_{pz}\left(z_{t2} + b\varphi_{t2} + d_p\theta_{t2} - \frac{d_p}{a}z_{4r}\right) - c_{pz}\left(\dot{z}_{t2} + b\dot{\varphi}_{t2} + d_p\dot{\theta}_{t2} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{4r}\right) \\ F_{pz4l} = -k_{pz}\left(z_{t2} + b\varphi_{t2} - d_p\theta_{t2} - \frac{d_p}{a}z_{4l}\right) - c_{pz}\left(\dot{z}_{t2} + b\dot{\varphi}_{t2} - d_p\dot{\theta}_{t2} - \frac{d_p}{a}\dot{z}_{4l}\right) \end{cases}$$

Ecuación (26)



# **Anexo C. Elementos SIMPACK**

Para modelar un determinado sistema se dispone de varios tipos de elementos que se describen a continuación:

- *Bodies*: cuerpos que constituyen el modelo. A través de su ventana de propiedades se puede modificar todo tipo de características, como la posición, dimensiones, masa, inercia y aspectos estéticos entre otros.
- *Joints*: Son elementos clave para el funcionamiento del modelo. Sirven para establecer los grados de libertad de los elementos. Cada cuerpo “body” lleva asociado una “joint” que describe su posibilidad de movimiento en el espacio.
- *Markers*: Son elementos que definen puntos en el espacio y que van asociados a un determinado cuerpo. Sirven para colocar los distintos elementos de un modelo en el espacio y asociarlos a uno u otro cuerpo del mismo.
- *Force elements*: Son elementos que proporcionan una fuerza en base a sus características técnicas. En este proyecto se han usado resortes y amortiguadores para la suspensión pasiva y actuadores para la suspensión secundaria activa.
- *Control elements*: Este tipo de elementos tienen muchas aplicaciones y categorías. Son elementos que pueden funcionar como sensores, ya sean de posición, de velocidad, como acelerómetros, etc; también permiten tratar señales de otros elementos del modelo, ya sean otros “control elements” o de otro tipo. En este proyecto se han utilizado elementos de este tipo para acelerómetros, para un integrador y para la interacción de SIMPACK con Simulink.
- *Expressions*: son elementos a través de los cuales se puede medir, tratar señales procedentes de otros elementos (operaciones matemáticas por ejemplo) y generar señales que se envíen a otros elementos, entre otros. En este proyecto se han utilizado elementos de este tipo para medir la aceleración de los extremos superiores de los amortiguadores, haciendo las veces de acelerómetro. Además se han utilizado para obtener la señal de la fuerza procedente de Simulink para enviarla a los actuadores.

- *Tracks*: estos elementos definen el camino por el que circula el vehículo. Se pueden modificar para disponer tramos rectos, curvos o las irregularidades del trazado.
- *Excitations*: permiten definir distribuciones de todo tipo para poder, como en el presente proyecto, establecer la irregularidad del perfil de la vía.
- *Substructures*: SIMPACK permite trabajar en una estructura principal y dentro de ella añadir otras subestructuras previamente creadas. Esto permite simplificar el modelo y el desarrollo del mismo. En este caso, se ha creado el conjunto ruedas-eje como primera estructura. Después, se ha creado el bogie, dentro del cual se han incluido dos subestructuras del conjunto ruedas-eje. Por último, se ha generado la estructura principal del vehículo en la que se han incluido dos subestructuras de bogie; de manera que no ha hecho falta construir 4 conjuntos ruedas-eje ni 2 bogies.
- *Rails*: representan los raíles. Se pueden definir o tomar modelos preestablecidos por SIMPACK como el modelo UIC60.
- *Rail-Wheel Pairs*: Definen el contacto rueda-carril, permitiendo elegir entre varios tipos.
- *Wheelsets*: Una vez definidos las ruedas y los ejes, a través de estos elementos se genera un cuerpo que engloba la rueda y los ejes.



# **Anexo D. Pasos técnicos para la creación de un vehículo ferroviario en SIMPACK**

## D.1. Creación de la subestructura “juego de ruedas”

Para crear la subestructura “juego de ruedas”, se pueden seguir los pasos descritos en el apartado *F.4.1. Creating a guidedwheelset* de la ayuda de SIMPACK o utilizar el modelo de plantilla proporcionado por SIMPACK. En este último caso, los pasos a seguir son:

- Crear un nuevo modelo de tipo “Rail\_Wheelset”.
- Salvar el modelo con el nombre *WSen* en la carpeta “subestructuras”.
- Para conectar las ruedas con la suspensión primaria del vehículo ferroviario, se deben crear 4 marcadores de tipo *IdentityMatrix* (Tabla 1 y Figura D.1).
- Salvar y cerrar el modelo.

Tabla 1. Marcadores en la subestructura “juego de ruedas” WS

Marcador	Posición
<b>PSR</b> ( <i>Primary Spring Right</i> )	(0, 1, 0)
<b>PSL</b> ( <i>Primary Spring Left</i> )	(0, -1, 0)
<b>PDR</b> ( <i>PrimaryDamperRight</i> )	(0, 1, 0)
<b>PDL</b> ( <i>PrimaryDamperLeft</i> )	(0, -1, 0)



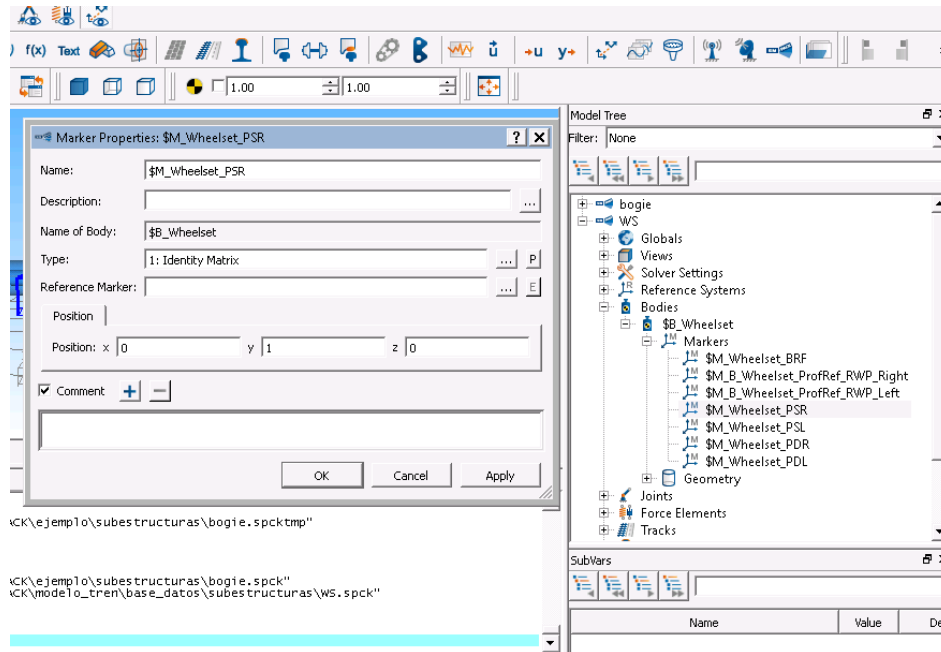


Figura D.1. Creación de marcadores en la subestructura “juego de ruedas” WS

## D.2. Creación de la subestructura “Bogie”

### D.2.1. Creación del “frame” del *bogie*

Los pasos a seguir para la creación del “frame” del *bogie* son los siguientes:

- Crear un nuevo modelo de tipo “Rail\_Track”. Con este tipo de plantilla, el sistema de referencia global y el valor de la gravedad ya están correctamente modificados de acuerdo a los criterios ferroviarios.
- Salvar el modelo con el nombre “bogie” en la carpeta “subestructuras”.
- Hay que indicar al programa donde están guardados las subestructuras, funciones de entrada, variables, etc. que va a utilizar. Para ello, en Globals->SearchPath se seleccionan las carpetas correspondientes (FiguraD.2).
- Crear el “juego de ruedas” trasero con el nombre “WSR”. Para ello, se importa la subestructura WS pulsando el botón “CreateSubestructure” (Figura y D.4).

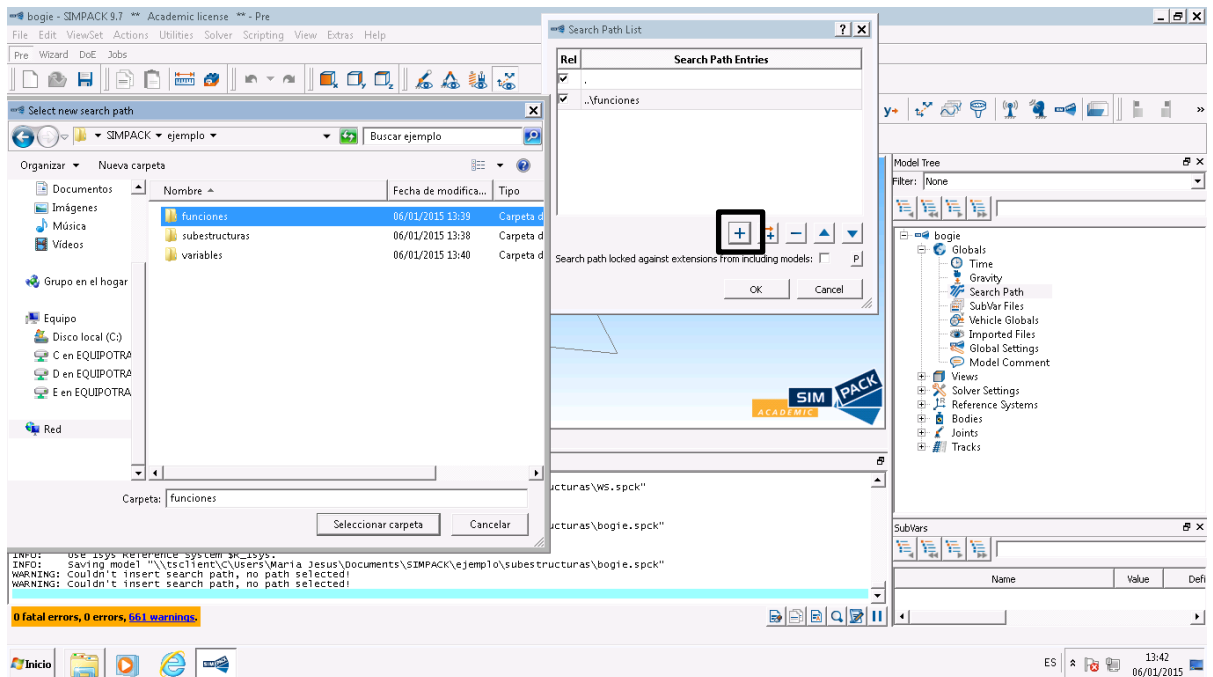


Figura D.2. Selección de las rutas de búsqueda

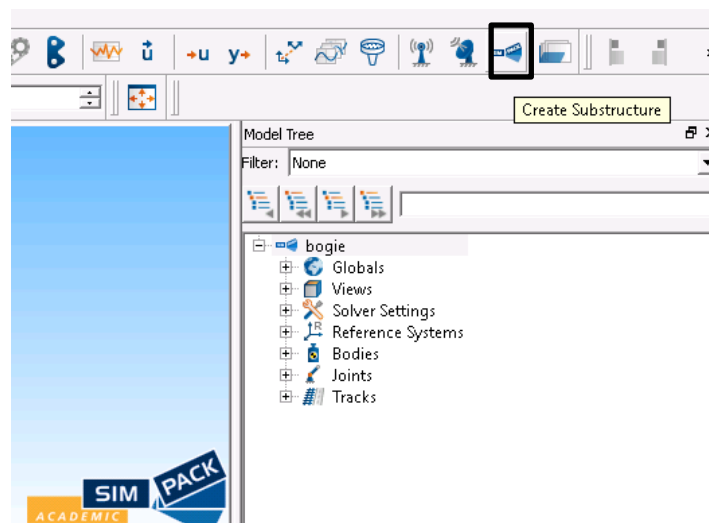


Figura D.3. Botón “CreateSubestructure”

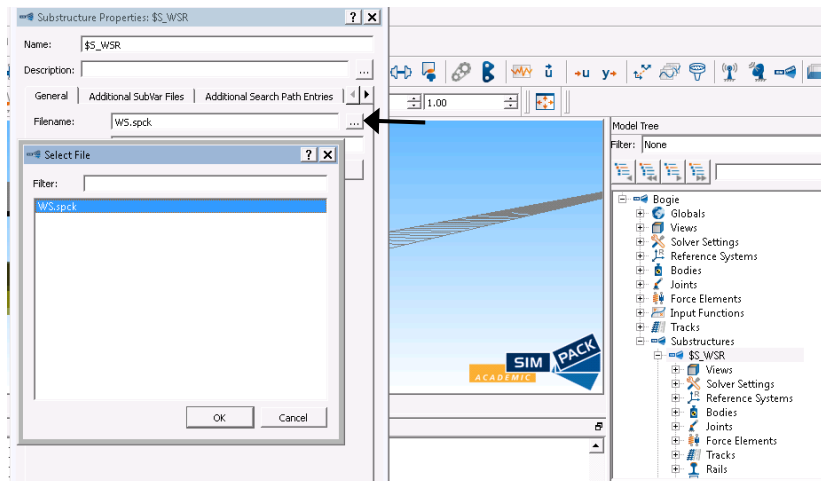


Figura D.4. Crear subestructura “\$\$\_WSR”

- Crear el “juego de ruedas” delantero con el nombre “WSF”.
- Cambiar la posición longitudinal de los juegos de ruedas creados. Para ello, modificar el valor “Longitudinal position” del elemento “Joint” de cada juego de ruedas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura ).

Tabla 2.Valores de la posición longitudinal en los juego de rueda

Subestructura	Valor
WSF	1.28
WSR	-1.28

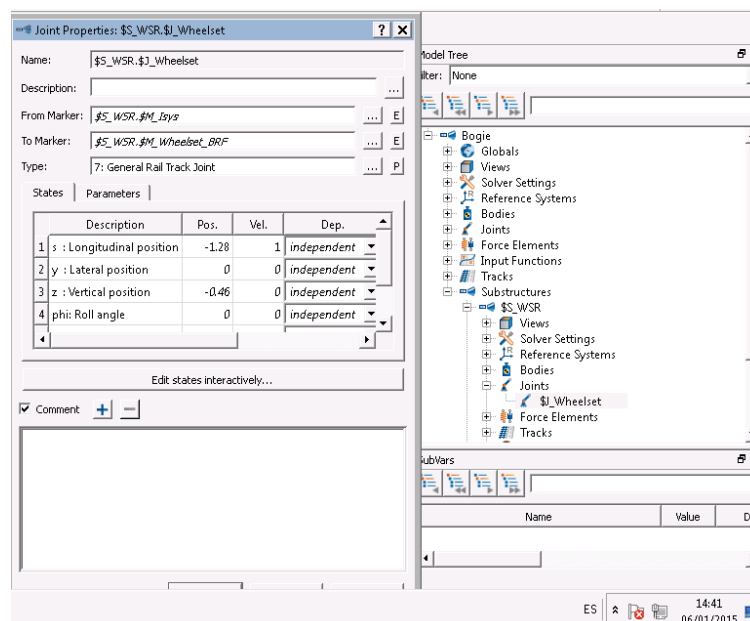


Figura D.5. Cambio del valor de la posición longitudinal en el juego de ruedas WSR

- El modelo debería quedar como el mostrado en la Figura D.6.

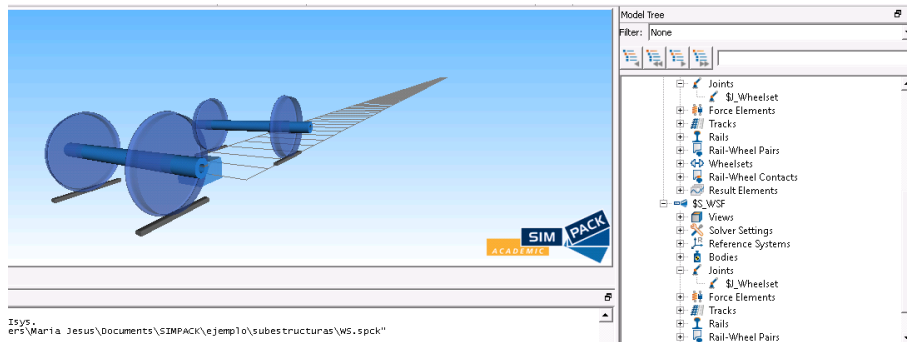


Figura D.6. Modelo de dos juegos de ruedas

- Renombrar el elemento “Body” creado por defecto (\$B\_Body) a \$B\_bogie e introducir los valores apropiados de masa y momentos de inercia (Figura D.7).

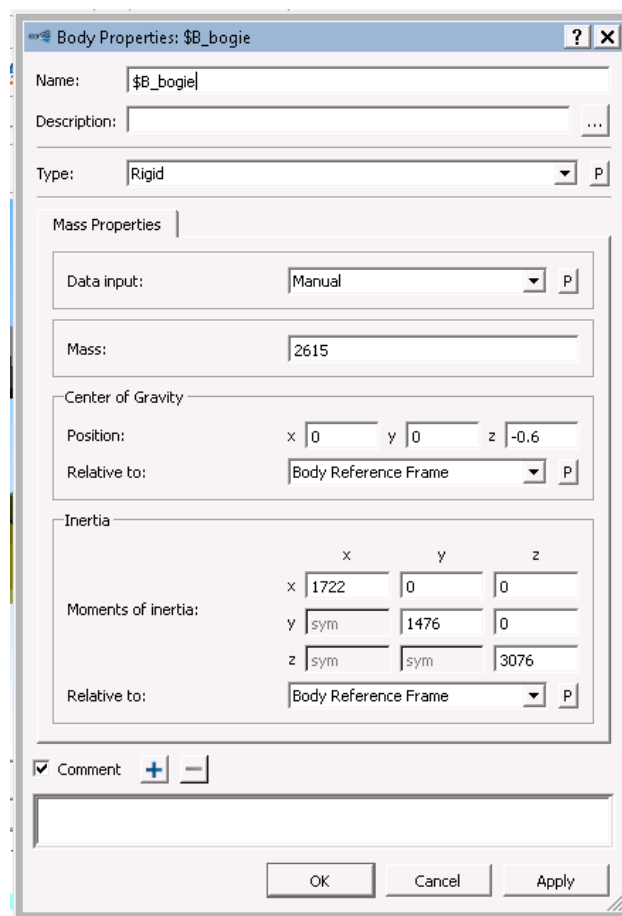


Figura D.7. Propiedades del elemento “Body” bogie

- Renombrar la *Primitiva* “\$P\_bogie\_cuboid” a “\$P\_bogie\_frame”, cambiar el tipo a “Wheel Rail Bogie” e introducir los valores apropiados (Figura D.8).

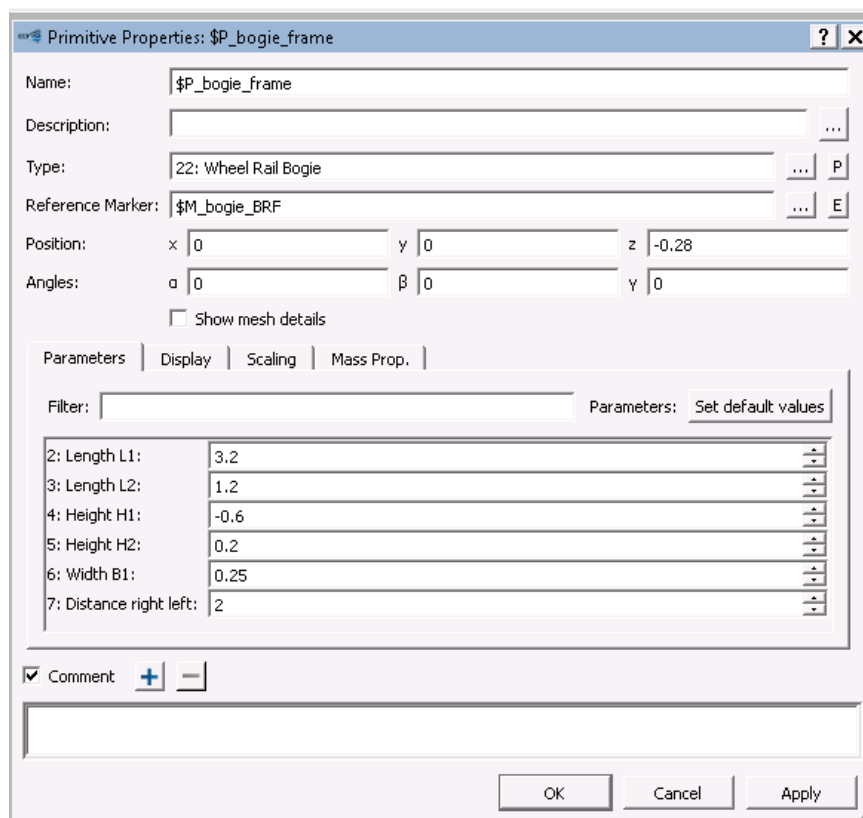


Figura D.8. Propiedades de la primitiva “\$P\_bogie\_frame” del elemento cuerpo “bogie”

- Crear otra primitiva para el elemento cuerpo “bogie” de tipo cubo con el nombre “\$P\_bogie\_frame\_cubo”. Introducir los valores adecuados (Figura ).

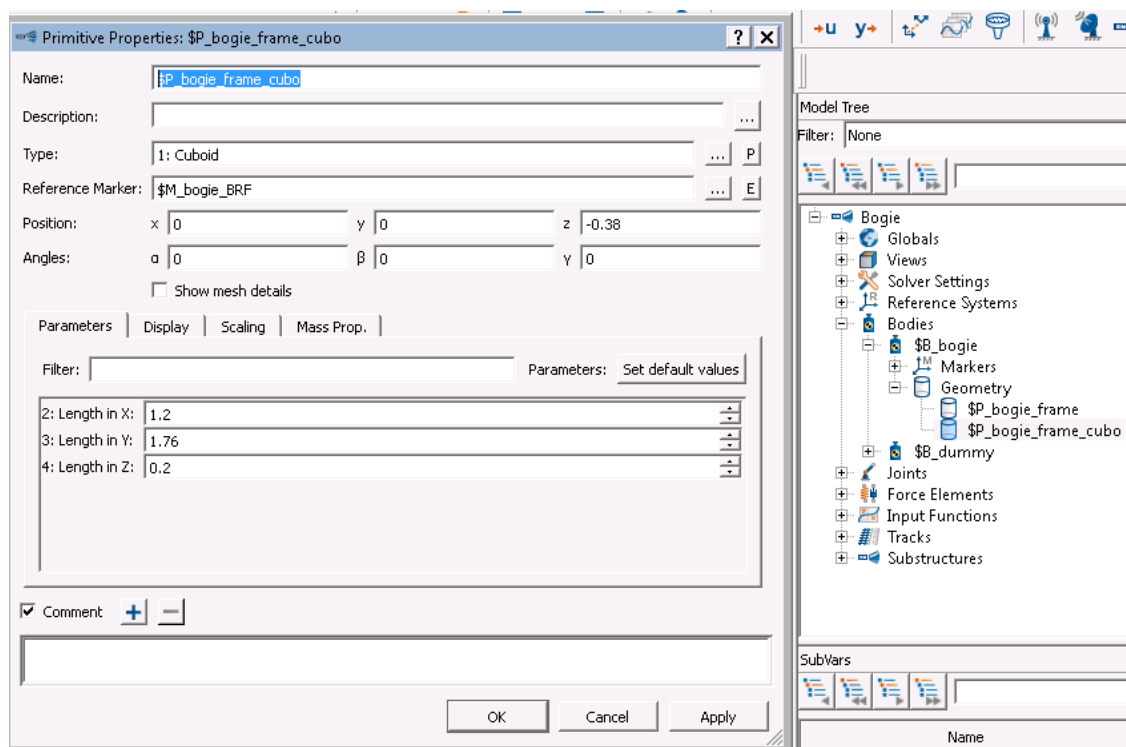


Figura D.9. Propiedades de la primitiva “\$P\_bogie\_frame\_cubo” del elemento cuerpo “bogie”

- Comprobar que el valor “Longitudinal position” del elemento “Joint” del cuerpo “bogie” es 0 (Figura ).

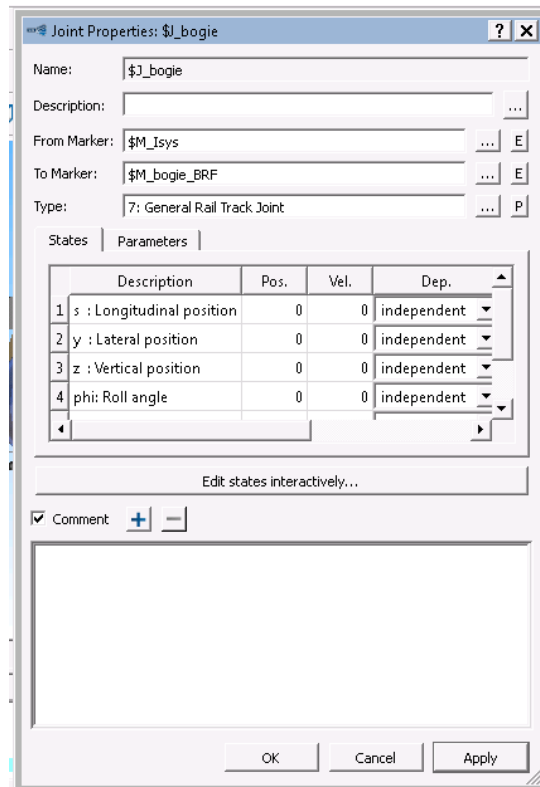


Figura D.10. Propiedades del elemento "Joint" del cuerpo "bogie"

- El modelo debería quedar como el mostrado en la Figura .

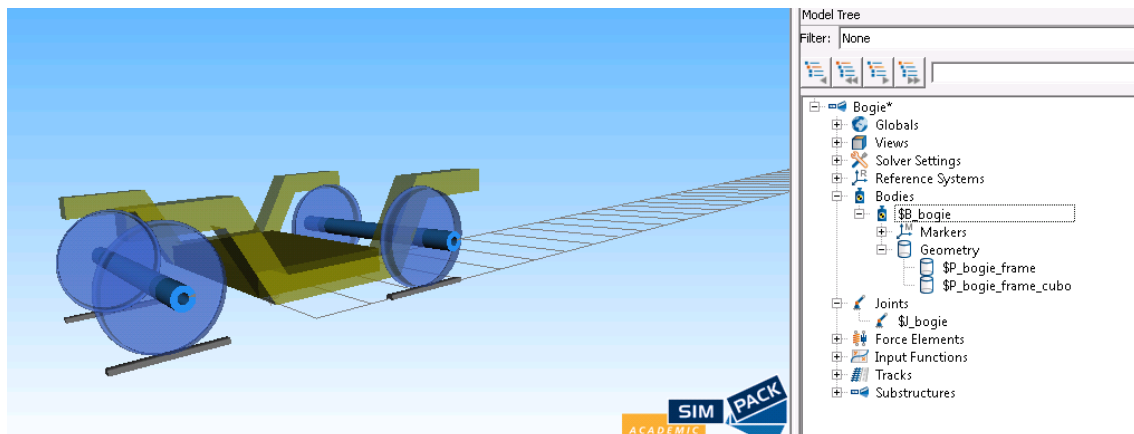


Figura D.11. Modelo de bogie I

- El bogie necesita marcadores para conectarse con la suspension primaria (muelles y amortiguadores verticales) y secundaria (muelles verticales y amortiguadores verticales y laterales). Los marcadores creados en el bogie son de tipo "IdentityMatrix" y sus valores son los mostrados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura . El programa permite ver los sistemas de coordenadas de los marcadores creados, como se observa en Figura .

Tabla 3. Valores de los marcadores del elemento cuerpo “bogie”

<b>Marcador</b>	<b>Posición</b>
<b>PrimSpring_FR</b>	(1.28, 1, -0.88)
<b>PrimSpring_FL</b>	(1.28, -1, -0.88)
<b>PrimSpring_RR</b>	(-1.28, 1, -0.88)
<b>PrimSpring_RL</b>	(-1.28, -1, -0.88)
<b>PrimDamp_FR</b>	(1.28, 1, -0.88)
<b>PrimDamp_FL</b>	(1.28, -1, -0.88)
<b>PrimDamp_RR</b>	(-1.28, 1, -0.88)
<b>PrimDamp_RL</b>	(-1.28, -1, -0.88)
<b>SecSpringR</b>	(0, 1, -0.525)
<b>SecSpringL</b>	(0, -1, -0.525)
<b>SecDampLatR</b>	(0, 0.23, -0.7)
<b>SecDampLatL</b>	(0, -0.23, -0.7)
<b>SecDampVertR</b>	(0, 1.3, -0.4)
<b>SecDampVertL</b>	(0, -1.3, -0.4)
<b>SecRoll</b>	(0, 0, -0.8725)
<b>TractionRod</b>	(0, 0, -0.6)
<b>Bumpstop</b>	(0, 0, -0.8725)



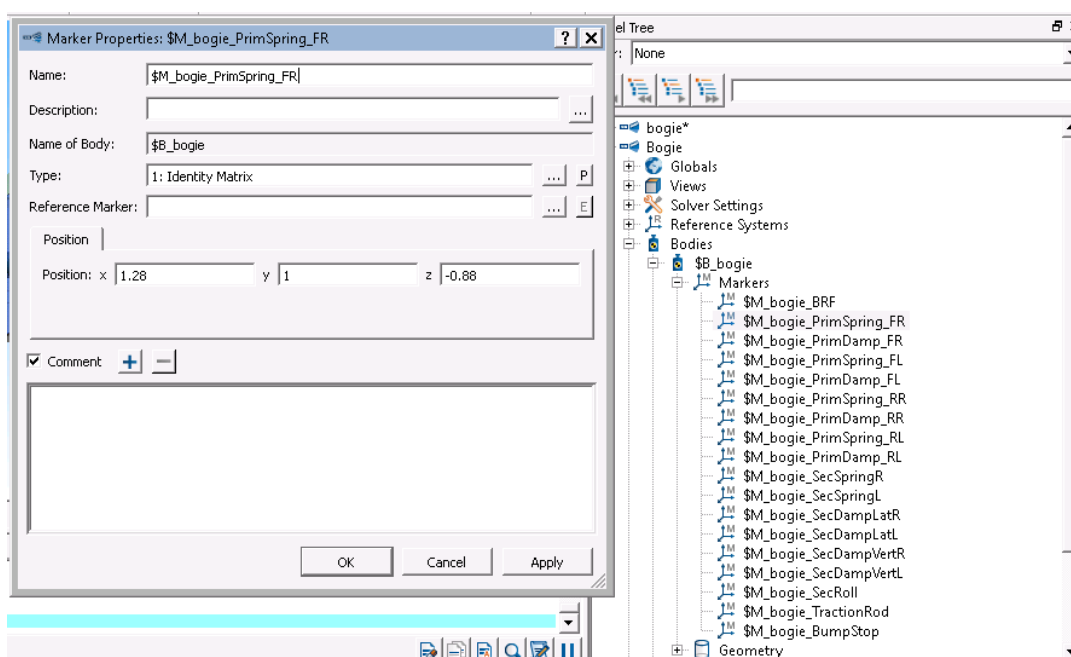


Figura D.12. Marcadores del elemento cuerpo “bogie”

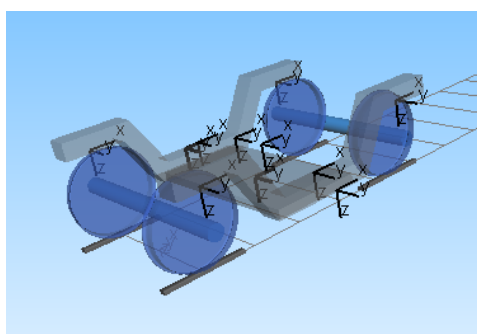


Figura D.13. Sistemas de coordenadas de los marcadores creados en el elemento cuerpo “bogie”

### D.2.2. Creación del cabezal fijo

El cabezal fijo (o *bolsterdummy*) es un cuerpo virtual de masa infinitésima que permite unir el bogie al vehículo ferroviario más fácilmente. El cabezal tiene 0 grados de libertad, ya que está fijo al vehículo ferroviario. Los pasos a seguir para la creación del cabezal fijo son los siguientes:

- Crear un nuevo elemento cuerpo con el nombre “\$B\_dummy” e introducir los valores apropiados (Figura ).

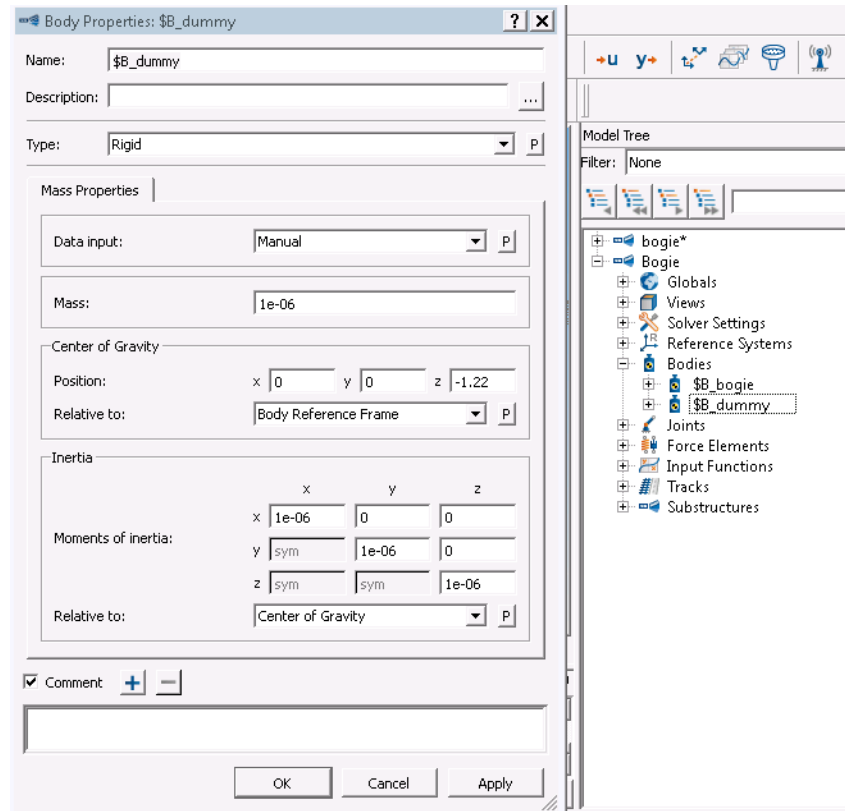
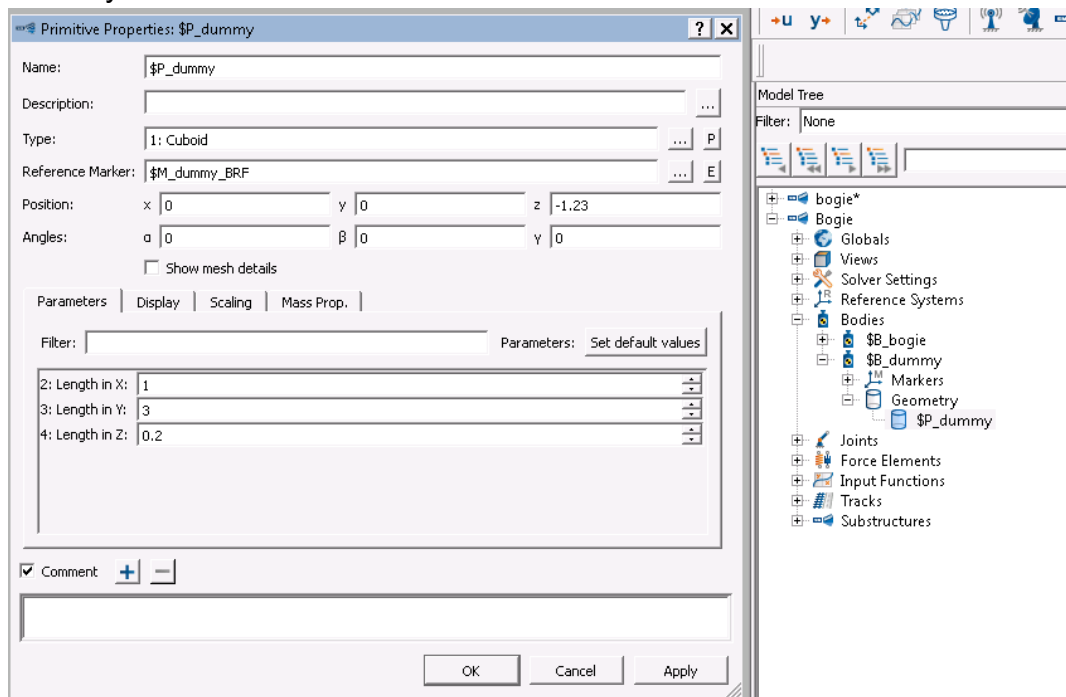


Figura D.14. Propiedades del elemento “Body” dummy

- Modificar los valores de la primitiva de tipo cubo para el elemento cuerpo “dummy” a los valores mostrados en la



- Figura .

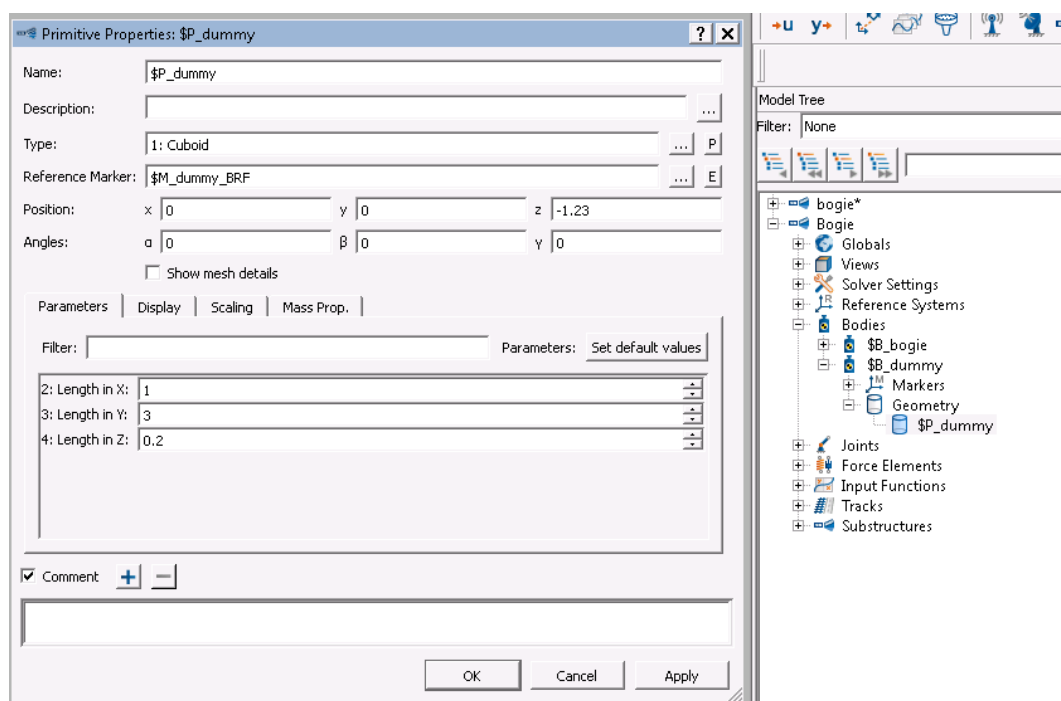


Figura D.15. Propiedades de la primitiva “\$P\_dummy” del elemento cuerpo “dummy”

- Comprobar que las propiedades del elemento “Joint” del cuerpo “dummy” son los mostrados en la Figura D.16.

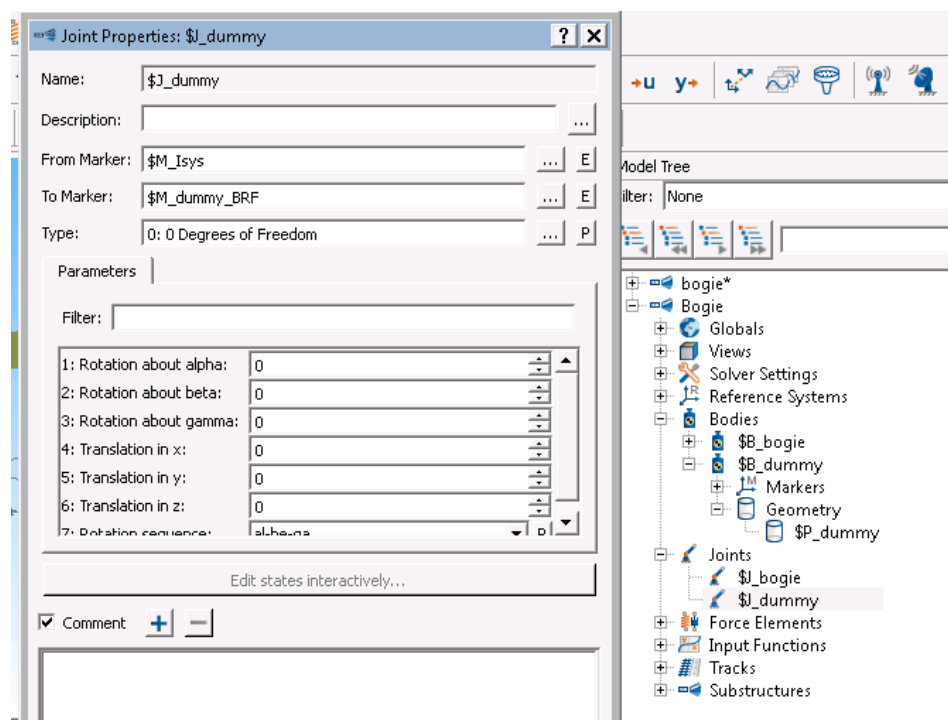


Figura D.16. Propiedades del elemento “Joint” del cuerpo “dummy”

- El cabezal fijo necesita 6 marcadores para conectarse con la suspensión secundaria (2 para conectarse con los muelles verticales y 4 para conectarse con los amortiguadores verticales y laterales). Los marcadores creados en el cabezal fijo son de tipo “IdentityMatrix” y sus valores son los mostrados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 4. Valores de los marcadores del elemento cuerpo “dummy”

Marcador	Posición
<b>SecR</b>	(0, 1, -1.13)
<b>SecL</b>	(0, -1, -1.13)
<b>DampRVert</b>	(0, 1.3, -0.925)
<b>DampLVert</b>	(0, -1.3, -0.925)
<b>DampRLat</b>	(0, 0.665, -0.7)
<b>DampLLat</b>	(0, -0.665, -0.7)
<b>SecRoll</b>	(0, 0, -0.8725)
<b>Bumpstop</b>	(0, 0, -0.65)

### D.2.3. Creación de la suspensión primaria

Los pasos a seguir para la creación de la suspensión primaria son los siguientes:

- Para el muelle perteneciente a la suspensión primaria de la rueda delantera derecha, crear un elemento de tipo “ForceElement” con el nombre “\$F\_PrimSpring\_FR” e introducir los valores mostrados en la Figura . Importante: el muelle tiene que tener una longitud nominal en la dirección z de valor 0.42 m (parámetro 34: *Nominal lengthz\_nom*).

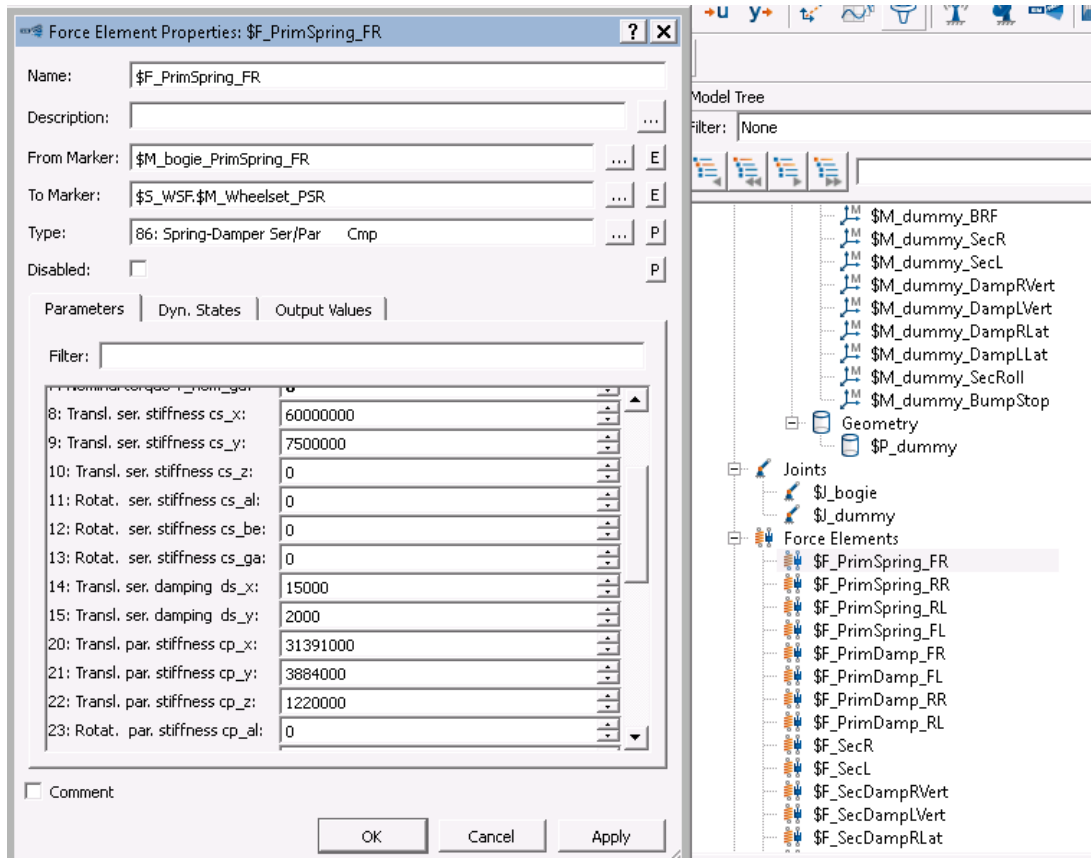


Figura D.17. Propiedades del elemento fuerza “\$F\_PrimSpring\_FR”

- Para el amortiguador perteneciente a la suspensión primaria de la rueda delantera derecha, crear un elemento de tipo “ForceElement” con el nombre “\$F\_PrimDamp\_FR”, importar la función de comportamiento del amortiguador definida en un fichero e introducir los valores mostrados en la Figura .

Para importar la función de comportamiento del amortiguador definida en el fichero “PrimDamp\_Vert\_d.if2”, crear un elemento de tipo “Input Function” con el nombre “\$I\_PrimDamper” y cargar el fichero “PrimDamp\_Vert\_d.if2” (Figura ).

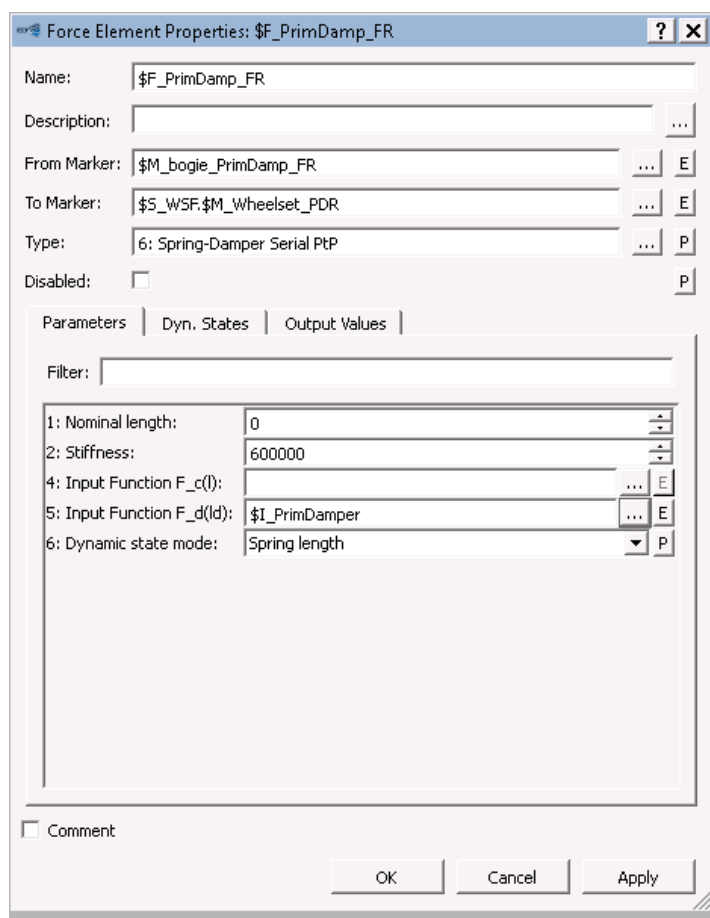


Figura D.18. Propiedades del elemento fuerza "\$F\_PrimDamp\_FR"

- Repetir los mismos pasos para las suspensiones primarias de las otras tres ruedas (Figura ).

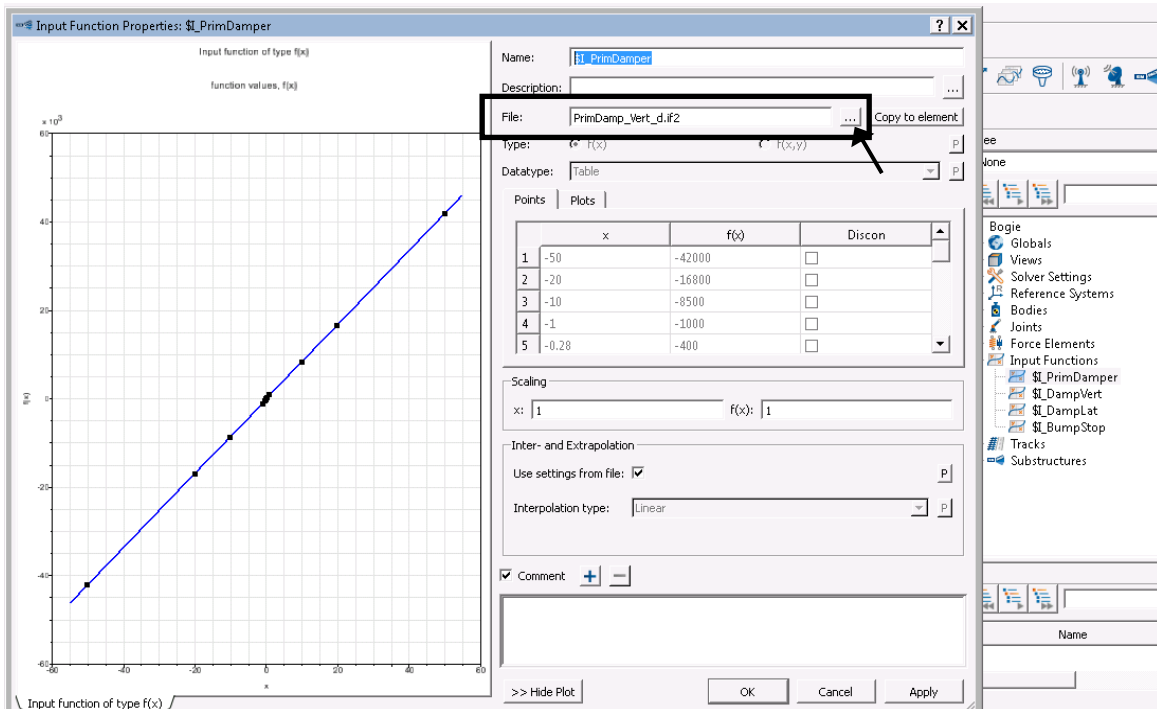


Figura D.19. Propiedades del elemento "Input Function" "\$I\_PrimDamper"

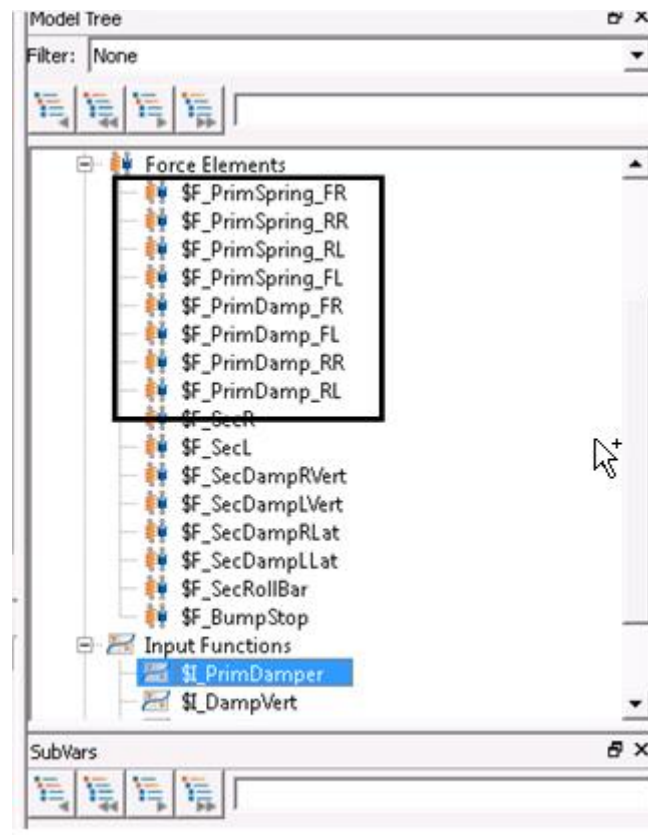


Figura D.20. Elementos fuerza correspondientes a la suspensión primaria

#### D.2.4. Creación de la suspensión secundaria

Los pasos a seguir para la creación de la suspensión secundaria son los siguientes:

- Para el muelle perteneciente a la suspensión secundaria del lado derecho, crear un elemento de tipo “ForceElement” con el nombre “\$F\_SecR” e introducir los valores mostrados en la Figura D..

Parameter	Value
3: l_nom_z Nominal height:	0.605
4: F_nom_x Nominal force:	0
5: F_nom_y Nominal force:	0
6: F_nom_z Nominal force=preload:	0
7: L_nom_x Nominal torque:	0
8: L_nom_y Nominal torque:	0
9: L_nom_z Nominal torque:	0
10: cx Longitudinal shear stiff.:	160000
11: cy Lateral shear stiffness:	160000
12: cz Vertical stiffness:	430000
13: cr Roll bending stiffness:	10500
14: cp Pitch bending stiffness:	10500
15: ct Torsional stiffness:	0

Figura D.21. Propiedades del elemento fuerza “\$F\_SecR”

- Para el amortiguador vertical perteneciente a la suspensión secundaria del lado derecho, crear un elemento de tipo “ForceElement” con el nombre “\$F\_SecDampRVert” e introducir los valores mostrados en la Figura . Para ello, primeramente se debe crear un elemento de tipo “Input Function” con el nombre “\$I\_DampVert” y cargar el fichero “SecDamp\_Vert\_d.if2” (Figura ).



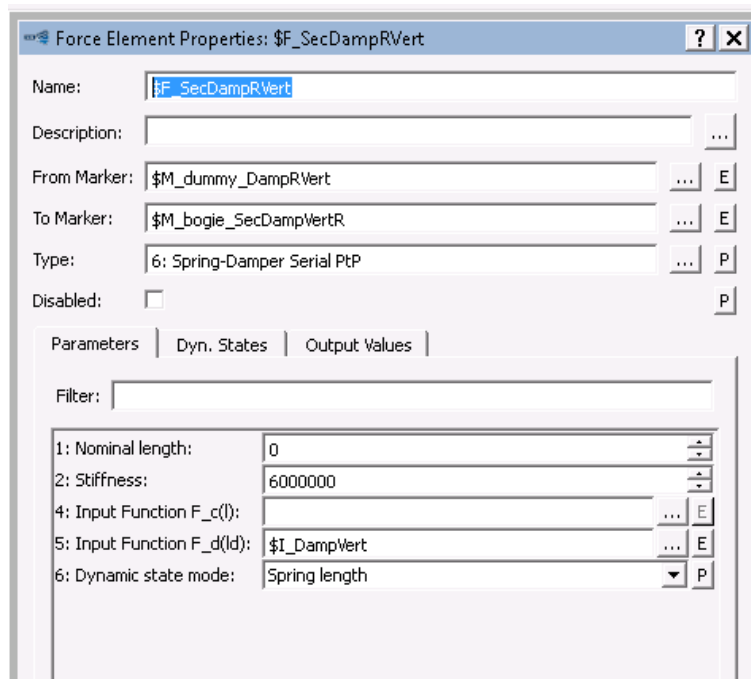


Figura D.22. Propiedades del elemento fuerza “\$F\_SecDampRVert”

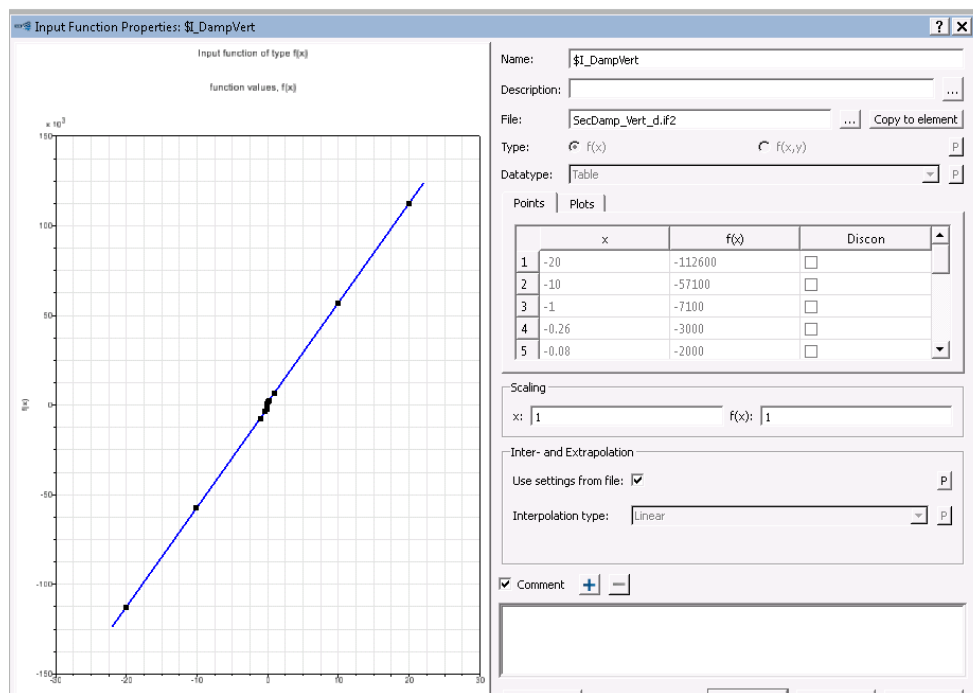
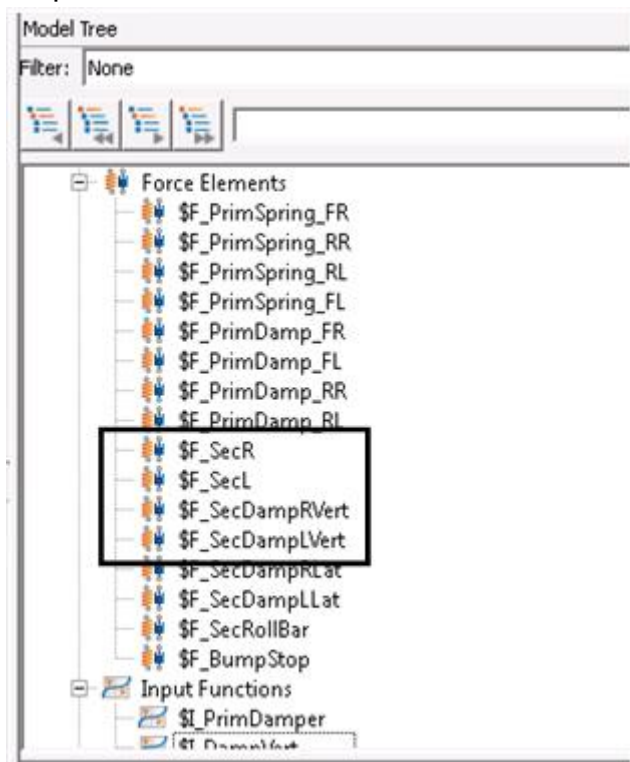


Figura D.23. Propiedades del elemento “Input Function” “\$I\_DamperVert”

- Repetir los mismos pasos para el muelle y amortiguador de la suspensión secundaria vertical del lado izquierdo (



- Figura ).

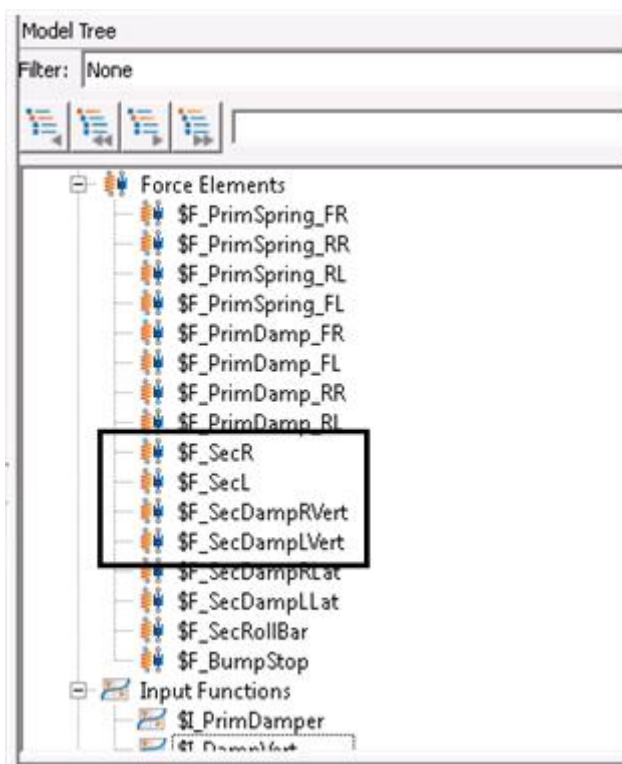


Figura D.24. Elementos fuerza correspondientes a la suspensión secundaria vertical

- Para los amortiguadores laterales pertenecientes a la suspensión secundaria seguir los mismos pasos que para los amortiguadores verticales de la suspensión secundaria (Figura ). Primero, se debe crear la función “\$I\_DampLat” importando los datos del fichero “SecDamp\_Lat\_d.if2”.

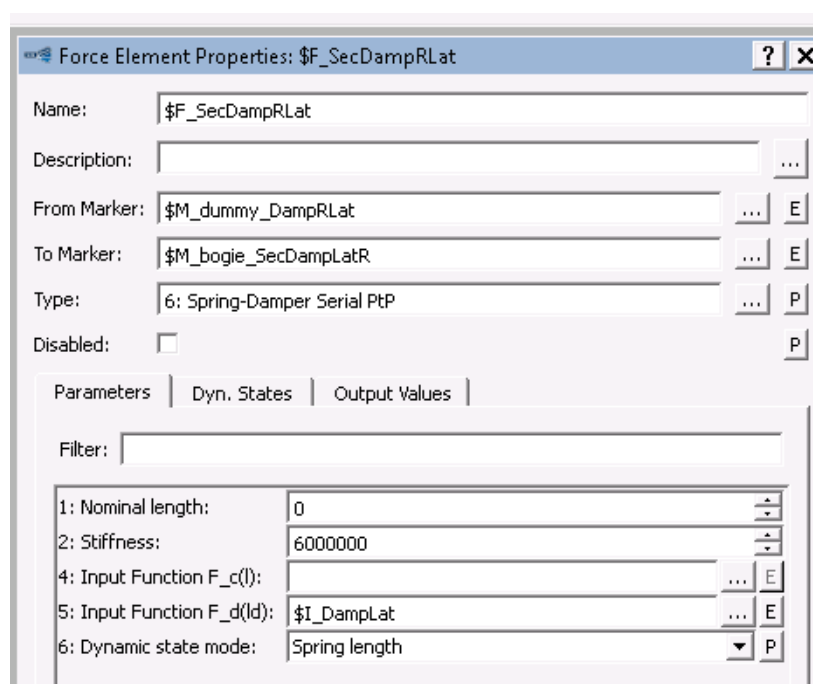


Figura D.25. Propiedades del elemento fuerza “\$F\_SecDampRLat”

- Modelar la barra anti torsión (Figura ).
- Modelar el *bumpstop* (Figura ). Primero, se debe crear la función “\$I\_BumpStop” importando los datos del fichero “Bumpstop.if2”.

Force Element Properties: \$F\_SecRollBar

Name: \$F\_SecRollBar

Description:

From Marker: \$M\_dummy\_SecRoll

To Marker: \$M\_bogie\_SecRoll

Type: 13: Spring-Damp Rot Meas Inp Cmp

Disabled: ☐

Parameters | Output Values

Filter:

1: Nominal torque in al:	0
2: Nominal torque in be:	0
3: Nominal torque in ga:	0
4: Stiffness in al:	940000
5: Stiffness in be:	0

☐ Comment

OK Cancel Apply

Figura D.26. Propiedades del elemento fuerza “\$F\_SecRollBar”

Force Element Properties: \$F\_BumpStop

Name: \$F\_BumpStop

Description:

From Marker: \$M\_dummy\_BumpStop

To Marker: \$M\_bogie\_BumpStop

Type: 5: Spring-Damper Parallel Cmp

Disabled: ☐

Parameters | Output Values

Filter:

1: Nominal force in x:	0
2: Nominal force in y:	0
3: Nominal force in z:	0
4: Stiffness in x:	0
6: Stiffness in z:	0
7: Damping in x:	0
8: Damping in y:	0
9: Damping in z:	0
10: Input Function Fc(x):	
11: Input Function Fc(y):	\$I_BumpStop
12: Input Function Fc(z):	
13: Input Function Fd(xd):	
14: Input Function Fd(yd):	

☐ Comment

OK Cancel Apply

Figura D.27. Propiedades del elemento fuerza "\$F\_BumpStop"9

- Guardar y cerrar el modelo.

### D.3. Creación del vehículo ferroviario

Los pasos a seguir para la creación del son los siguientes:

- Crear un nuevo modelo de tipo "Rail\_Track".
- Salvar el modelo con el nombre "wagon" en la carpeta "modelo\_principal".
- Indicar al programa donde están guardados las subestructuras, funciones de entrada, variables, etc. que va a utilizar (Globals->SearchPath).
- Importar los bogies, primero el *bogie* delantero y segundo el bogie trasero, mediante el boton "CreateSubstructure" (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

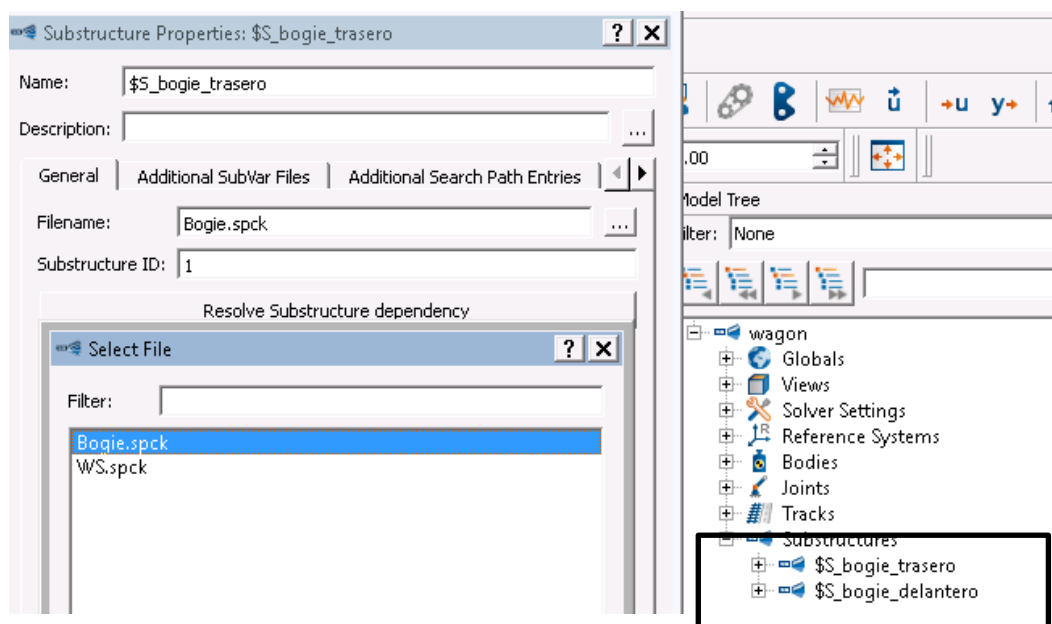


Figura D.28. Importar los dos bogies

- Modificar las posiciones longitudinales de los *bogies* y de las ruedas (Figura D. y Figura D.30):
  - Posición longitudinal del *bogie* trasero: 1.28 m.
  - Posición longitudinal del juego de ruedas delantero del *bogie* trasero: 2.56 m.

- Posición longitudinal del juego de ruedas trasero del *bogie* trasero: 0 m.
- Posición longitudinal del *bogie* delantero: 20.28 m.
- Posición longitudinal del juego de ruedas delantero del *bogie* delantero: 21.56 m.
- Posición longitudinal del juego de ruedas trasero del *bogie* delantero: 19 m.

Joint Properties: \$S\_bogie\_trasero.\$J\_bogie

Name: \$S\_bogie\_trasero.\$J\_bogie

Description:

From Marker: \$S\_bogie\_trasero.\$M\_Isys

To Marker: \$S\_bogie\_trasero.\$M\_bogie\_BRF

Type: 7: General Rail Track Joint

States | Parameters

	Description	Pos.	Vel.	Dep.	
1	s : Longitudinal position	1.28	0	independent	C
2	y : Lateral position	0	0	independent	C
3	z : Vertical position	0	0	independent	C
4	phi: Roll angle	0	0	independent	C
5	psi: Yaw angle	0	0	independent	C
6	gam: Pitch angle	0	0	independent	C

Figura D.29. Cambio de la posición longitudinal en los *bogies* y juegos de ruedas

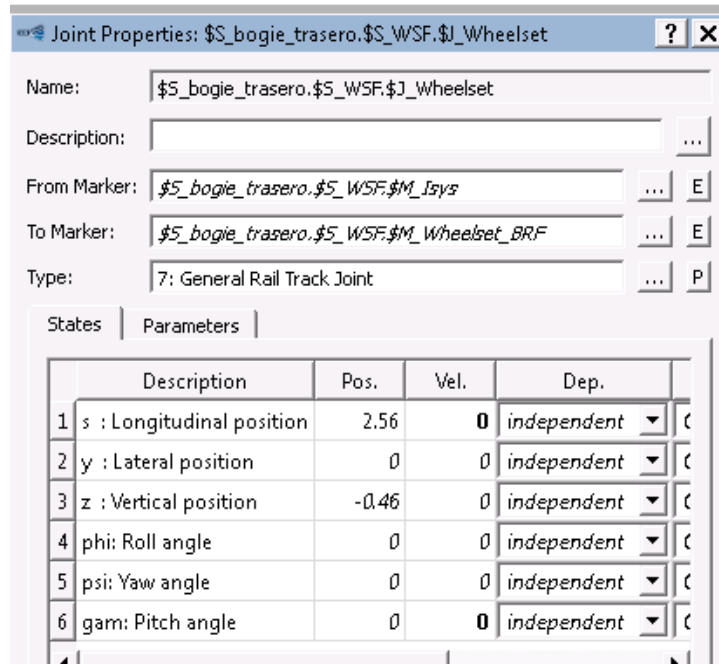


Figura D.30. Cambio de la posición longitudinal en los *bogies* y juegos de ruedas

- Renombrar el elemento “Body” creado por defecto ( $\$B\_Body$ ) a  $\$B\_wagone$  introducir los valores apropiados de masa y momentos de inercia (Figura D.). Es importante referir los momentos de inercia al centro de gravedad.

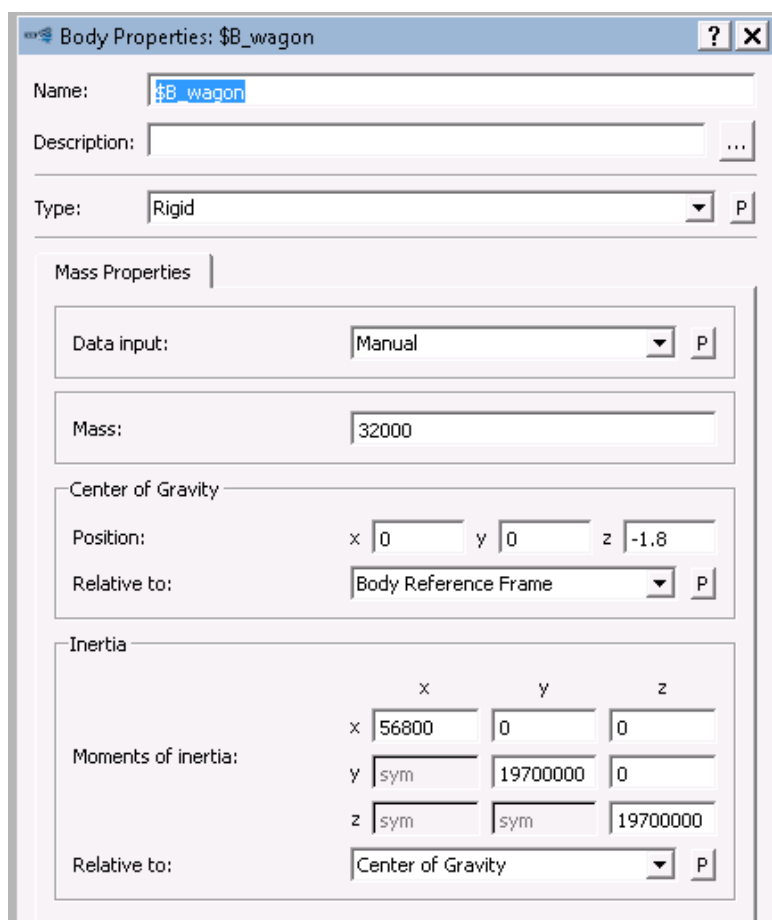


Figura D.31. Propiedades del elemento “wagon”

- Renombrar la *Primitiva* “\$P\_wagon\_cuboid” a “\$P\_wagon”, cambiar el tipo a “Wheel Rail Cab” e introducir los valores apropiados (Figura D. y Figura D.).
- Cambiar la posición longitudinal del wagon (Figura D.).
- Para conectar el wagon con los *bogies*, se deben crear 2 marcadores de tipo IdentityMatrix (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura D.).
- Unir los marcadores del wagon a los cabezales fijos de los *bogies* a través de los elementos “Joint” de cada cabezal fijo (Figura D.).
- El modelo de vehículo completo debería quedar como el mostrado en la Figura D..
- Salvar el modelo.
- Realizar una precarga del modelo (Figura D.).
- Especificar en “VehicleGlobals” una velocidad de, por ejemplo, 1 m/s.
- Realizar un “Test call” online y comprobar que las aceleraciones en las Joint son muy pequeñas.
- Iniciar una simulación “Online Time Integration”.



ic license <sup>ww</sup> - Pre

Primitive Properties: \$P\_wagon

Name: \$P\_wagon

Description: ...

Type: 21: Wheel Rail Cab ... P

Reference Marker: \$M\_wagon\_BRF ... E

Position: x 0 y 0 z 0

Angles: α 180 deg β 0 γ 0

☐ Show mesh details

Parameters | Display | Scaling | Mass Prop.

Filter: Parameters: Set default values

2: Show front cabin:	Yes	P
3: Show rear cabin:	Yes	P
4: Hide buffers:	Yes	P
5: Hide pantograph:	Yes	P
6: Show middle window:	Yes	P
7: Height 1 in X:	0.5	
8: Height 2 in X:	0.3	
9: Height 3 in X:	1.2	
10: Height 4 in X:	1.29	
11: Height 5 in X:	2	
12: Height 6 in X:	3.16	
13: Height 7 in X:	4.05	
14: Length 1 in X:	22.4	
15: Length 2 in X:	1.77	
16: Length 3 in X:	2.4	
17: Length 4 in X:	2.5	
18: Length 5 in X:	2.04	
19: Length 6 in X:	0.75	
20: Length 7 in X:	0.3	
21: Width 1 in X:	2.79	
22: Width 2 in X:	3.02	
23: Width 3 in X:	3.02	
24: Width 4 in X:	2.83	
25: Width 5 in X:	1.79	
26: Width 6 in X:	1.45	
27: Width 7 in X:	0.3	
28: Layer Length L8 in X:	26.6	
29: Layer Length L9 in X:	19	
30: Layer Length L10 in X:	3.8	
31: Pantograph X position:	0	
32: Window distance rear:	0.36	
33: Window distance front:	0.4	
34: Window distance bottom:	0.66	

Figura D.32. Propiedades de la primitiva "\$P\_wagon" del elemento cuerpo "wagon". Parámetros

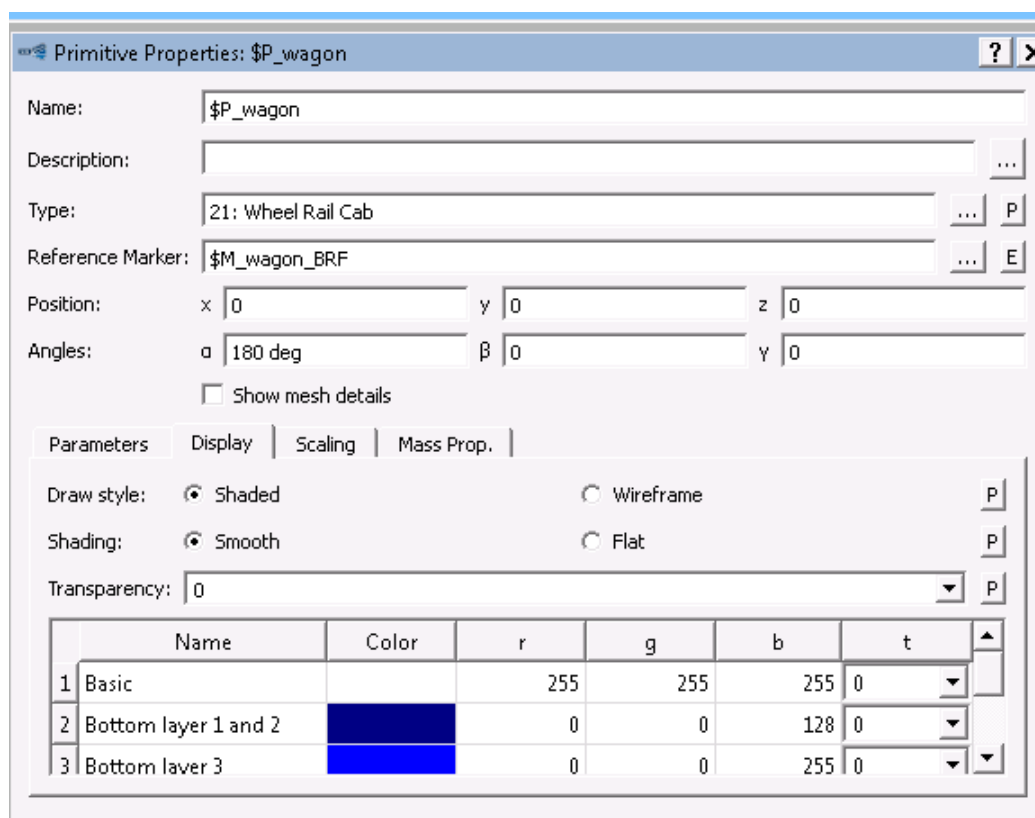


Figura D.33. Propiedades de la primitiva "\$P\_wagon" del elemento cuerpo "wagon". Display

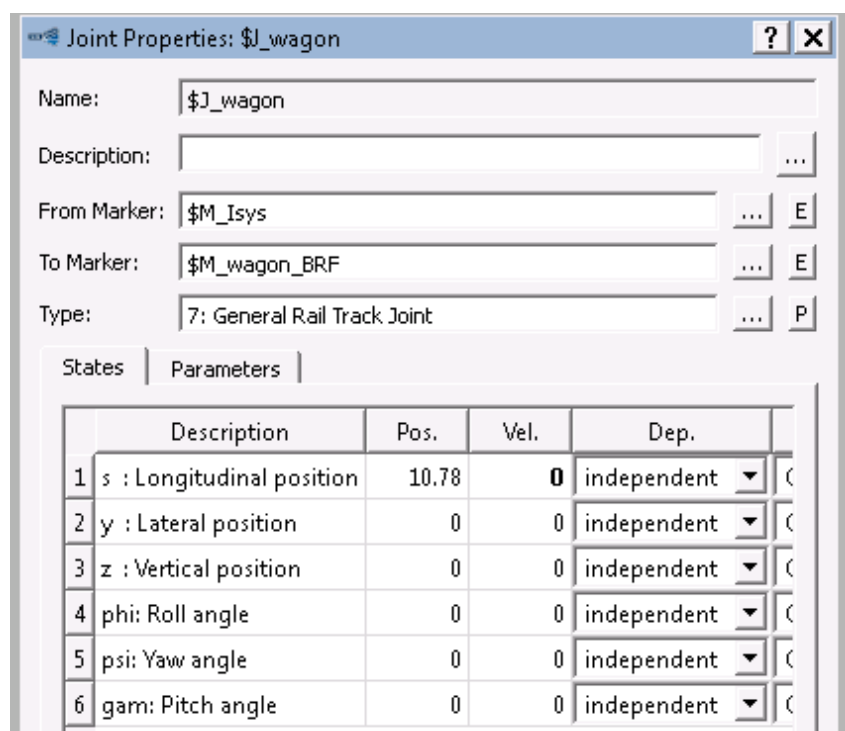


Figura D.34. Cambio de la posición longitudinal en el wagon

Tabla 5. Marcadores en el wagon

Marcador	Posición
<b>bogie_delantero</b>	(9.5, 0, 0)
<b>bogie_trasero</b>	(-9.5, 0, 0)

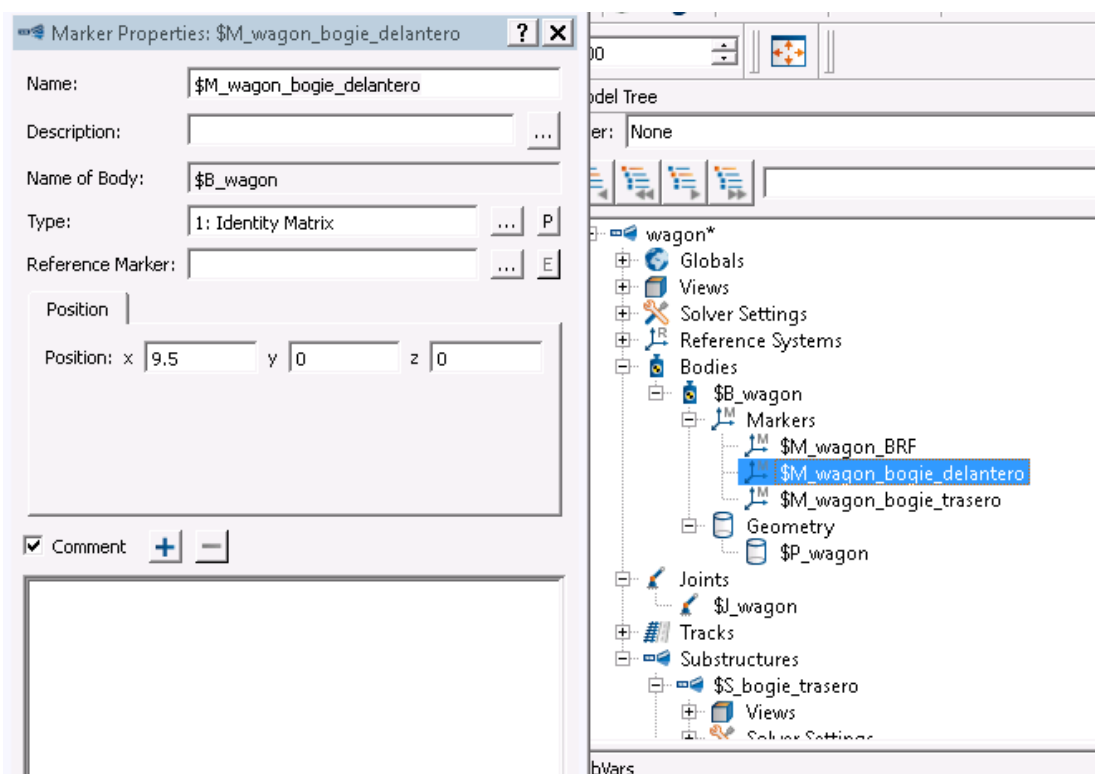


Figura D.35. Creación de marcadores en el wagon

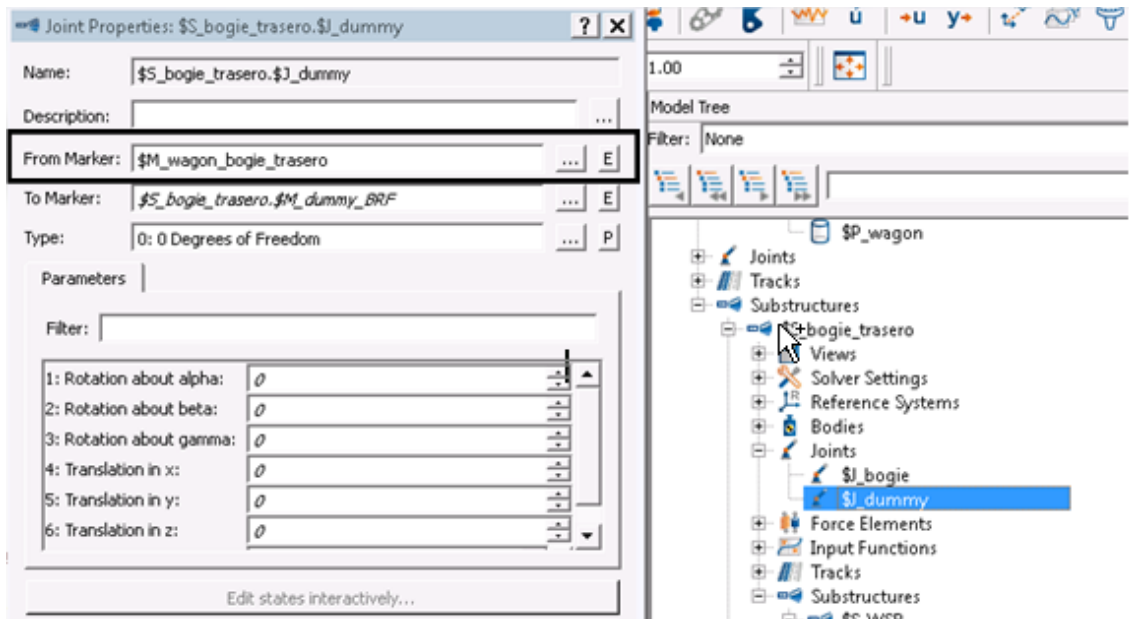


Figura D.36. Unión de los marcadores del wagon a los cabezales fijos de los bogies

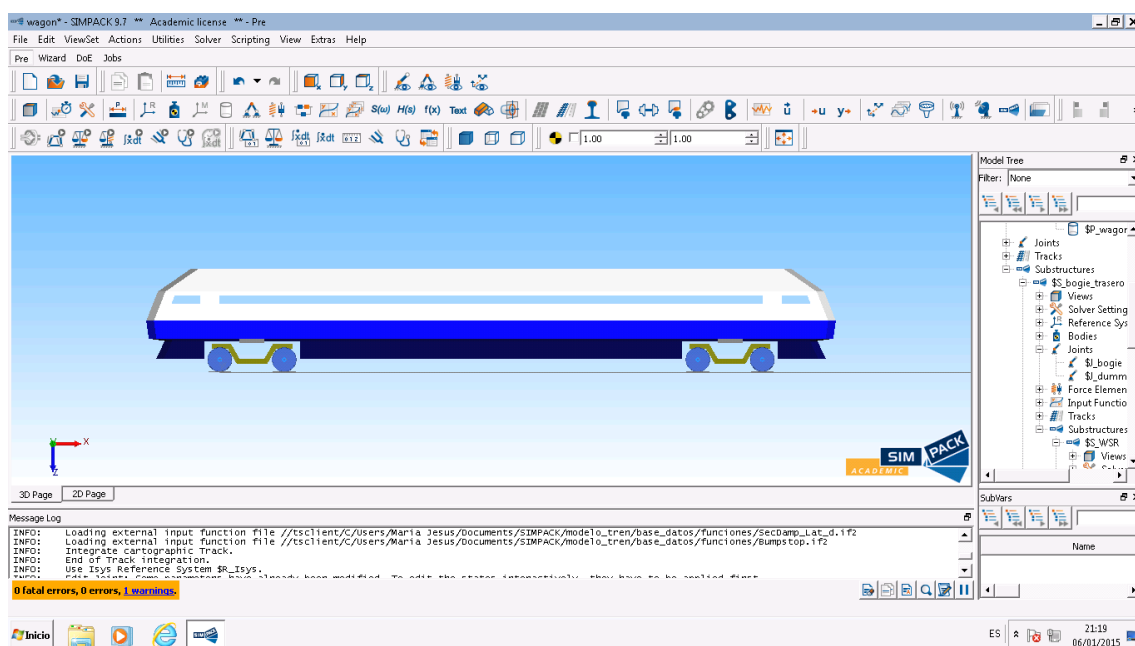


Figura D.37. Modelo de vehículo completo

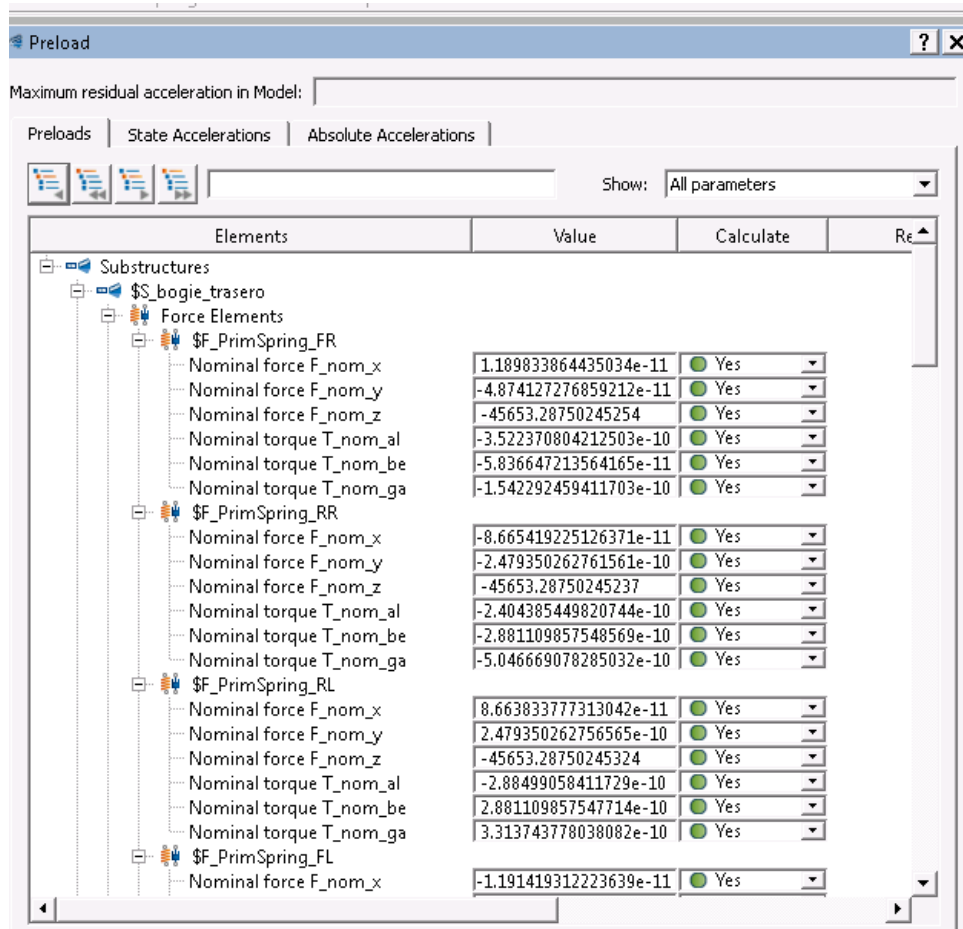


Figura D.38. Precarga